

Universidad Nacional de Rosario  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras



Tesis Doctoral

## **MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE ADHERENCIA NEUMÁTICO CALZADA**

Magister Ing. Marta Beatriz Pagola

Director de tesis: Dr. Gerardo Flintsch

Miembros del Jurado: Dr. Hugo Bianchetto  
Dr. Francisco Morea  
Dr. Adrián Nosetti

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en  
cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

**Doctor en Ingeniería**

Rosario, 2012



Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



Marta Beatriz Pagola



## **AGRADECIMIENTOS**

A todas las personas que colaboraron durante las tareas involucradas en las investigaciones volcadas en esta tesis.

A mi Director de Tesis, Dr. Gerardo Flintsch, por la paciencia y por haberme brindado los resultados de las mediciones realizadas en la Pista de ensayos de Virginia.

Al Profesor Jorge Páramo y al personal de la empresa Ausol por haberme hecho partícipe de sus estudios para seguimiento periódico del comportamiento de los tramos en el Acceso Norte a la Capital Federal.

Al personal del Laboratorio Vial del IMAE, por su participación en las mediciones de campaña.

Finalmente, y fundamentalmente a mi colega y esposo Oscar Giovanon, por su colaboración, apoyo y participación en todas las tareas.



## RESUMEN

La adherencia neumático calzada es un parámetro característico de la superficie del pavimento, que se encuentra fuertemente relacionado a la seguridad de circulación que tienen los usuarios que circulan por la ruta. La misma no es constante, sino que partiendo de un valor inicial va decreciendo hasta alcanzar un valor mínimo, el cual es función del nivel de tránsito, el tipo de superficie de rodamiento, el tipo de agregados pétreos, la configuración del tránsito, etc.

En el presente proyecto se realizaron mediciones de coeficiente de fricción y macrotextura en distintos tramos de ruta, con distintos tipos de equipos durante determinados períodos de tiempo. Las situaciones analizadas y las principales conclusiones obtenidas en cada una son:

- Mediciones en tramos de las Pista de Ensayos de la Universidad de Virginia, Blacksburg, Estados Unidos. Son 14 tramos ubicados en la pista, los mismos no están sometidos a tránsito y son utilizados para investigación. Se utilizaron dos equipos para medir el coeficiente de fricción: trailer de rueda bloqueada y Dynamic Friction tester, mientras que la macrotextura fue medida con Circular Texture meter.

Los tramos se midieron en forma periódica durante más de un año. A partir de los resultados se valoró la influencia que la temperatura tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción y se comparó la misma con influencia presente en los factores de corrección actualmente utilizados en el Estado de Virginia para corregir los resultados.

- Mediciones en tramos ubicados en pista de aeropuerto. Se midieron 3 tramos en repetidas ocasiones, el coeficiente de fricción se midió con Péndulo de Fricción tipo TRRL, y la macrotextura con Círculo de Arena. Estos tramos están ubicados cercanos al borde de la pista, y no tienen ningún tipo de tránsito.



En esta situación se analizó la influencia de la temperatura en las mediciones realizadas con Péndulo de Fricción y se comprobó la validez de la corrección por temperatura indicada en la norma de ensayo utilizada para este equipo.

- Mediciones en tramos ubicados en autopista con tránsito elevado. Fueron medidos 16 tramos de 300 metros en forma periódica (anual) durante 11 años. Las mediciones de coeficiente de fricción se realizaron con Péndulo de Fricción tipo TRRL, y la macrotextura con Círculo de Arena. Durante este período los tramos estuvieron sometidos al tránsito normal circulante en la autopista (autos, camiones, colectivos).

El seguimiento sistemático de los mismos permitió valorar la evolución en servicio de la mezcla asfáltica utilizada como rodamiento, desde el punto de vista de la adherencia neumático calzada. Estas mediciones permitieron el desarrollo de modelos de evolución, para predecir el comportamiento del coeficiente de fricción y la macrotextura para mezclas asfálticas tipo F10, elaboradas con agregados pétreos de Argentina y sometidas a las condiciones de servicio (tránsito, clima y limpieza) de una autopista con tránsito elevado.

Se realizó un análisis bibliográfico acerca de la adherencia neumático calzada y los modelos de predicción disponibles en otros países. El análisis de los resultados de mediciones periódicas disponibles permitió confirmar que la temperatura tiene influencia en los resultados de coeficiente de fricción medido con equipos. Además, el disponer de mediciones periódicas durante un período de 11 años, permitió el desarrollo de modelos de predicción de mezclas asfálticas tipo F10 en autopista, los cuales podrán ser utilizados en experiencias futuras para predecir la calidad que la carpeta de rodamiento brinda a la seguridad de los usuarios.



## ABSTRACT

Tire road adherence is a characteristic parameter of pavement surface, which is strongly related to road user's safety. It is not constant along road life, from an initial value it decreases until a minimum value, which is a function of traffic level, surface type, aggregates, traffic configuration, etc..

In this project coefficient of friction and macrotexture in some road sections were measured, with different types of equipment, and during certain periods of time. The situations analyzed and the main conclusions of each one are:

- Measurements on 14 sections of test track at the University of Virginia, Blacksburg, USA. The sections are not subject to traffic and are used for research. Friction coefficient was measured with two equipments: locked wheel trailer and Dynamic Friction Tester, while macrotexture was measured with Circular Texture Meter.

Sections were measured periodically for over one year. From results, the influence that temperature has on the results of coefficient of friction was evaluated, and results were compared with correction factors currently used in the State of Virginia to correct friction coefficient results.

- Measurements in sections located in airport runway. 3 sections were measured periodically; friction coefficient was measured with TRRL Pendulum Tester and macrotexture with Sand Patch. Sections are located near the edge of the track, and have no traffic.

In this situation, the influence of temperature on measurements made with Friction Pendulum was analyzed, and checked the validity of temperature correction used in the Standard used for this equipment.

- Measurements in sections located in a high traffic highway. 16 sections of



300 meters were measured periodically during 11 years. Friction coefficient measurements were made with type TRRL Pendulum and macrotexture with Sand Patch. During this period sections were under normal highway (cars, trucks, buses).

Systematic monitoring of surface parameters allowed the analysis of asphalt mix surface performance, from the viewpoint of road tire adherence. Deterioration models were developed to predict asphalt mix type F10 behavior for friction coefficient and macrotexture, particularized for Argentina highway conditions (aggregates, traffic, weather and cleanliness conditions), in one of highway sections with higher traffic in Argentina.

A literature review on road tire adherence and prediction models available in other countries was done. The analysis of periodic sections results confirmed that temperature has influence on friction coefficient results. In addition, periodic measurements done over a period of 11 years, allowed the development of deterioration models of mix type F10 used in highway, which may be used in future experiences to predict the quality and security level offer to users.



## MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE ADHERENCIA NEUMÁTICO CALZADA

### ÍNDICE

CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Descripción del problema a analizar .....	3
1.2	Objetivos específicos de la tesis .....	4
1.3	Importancia de la misma .....	4
1.4	Secciones que componen la tesis .....	5
CAPÍTULO 2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1	Aspectos de la superficie del pavimento involucrados .....	6
2.2	Medición de la adherencia neumático calzada .....	9
2.2.1	Medición del coeficiente de fricción .....	9
2.2.2	Medición de la macrotextura .....	17
2.2.3	Índice de Fricción Internacional .....	20
2.3	Variaciones en el tiempo .....	24
2.3.1	Variación permanente del coeficiente de fricción .....	25
2.3.1.1	Modelo HDM 4 .....	27
2.3.1.2	Modelos Transport Research Laboratory .....	28
2.3.1.3	Evolución según el Laboratorio Central de Puentes y Caminos .....	31
2.3.2	Variación permanente de la textura .....	32
2.3.2.1	Modelo de Pérdida incremental de macrotextura .....	33
2.3.2.2	Evolución según el LCPC .....	35





2.3.3	Variación estacional del coeficiente de fricción .....	36
2.3.3.1	Modelos desarrollados en Texas, EEUU .....	38
2.3.3.2	Procedimiento de normalización, FHWA 1989 .....	42
2.3.3.3	Factores de corrección mensual empleados en algunos Estados de Estados Unidos .....	43
2.3.3.4	Modelos del LCPC para equipo Scrim .....	45
2.3.3.5	Manejo de los resultados Scrim en Inglaterra .....	47
2.3.3.6	Variación de los resultados del Péndulo de Fricción ...	49
2.4	Proyecto TYROSAFE .....	50
2.5	Proyecto SKIDSAFE .....	56
2.6	Estudios previos realizados en la UNR .....	59
2.6.1	Determinación del IFI en Argentina .....	62
2.6.2	Variación de los resultados de Mu Meter con la temperatura	65
2.6.3	Estimación del Mu de Referencia .....	69
2.7	Análisis material bibliográfico .....	72
CAPÍTULO 3. RESULTADOS DISPONIBLES PARA ANÁLISIS, MEDICIONES EN TRAMOS DE RUTA .....		74
3.1	Tramos en Virginia Smart Road .....	75
3.1.1	Tipo de superficie de rodamiento .....	75
3.1.2	Tránsito .....	77
3.1.3	Clima .....	77
3.1.4	Mediciones realizadas .....	79



3.1.5	Mediciones de coeficiente de fricción con Trailer rueda bloqueada .....	79
3.1.6	Mediciones de coeficiente de fricción con DFT Tester .....	81
3.1.7	Mediciones de macrotextura con CTmeter .....	82
3.2	Tramos en Aeropuerto .....	83
3.2.1	Resultados obtenidos .....	84
3.3	Tramos en Autopista con tránsito elevado .....	87
3.3.1	Tipo de superficie de rodamiento .....	89
3.3.2	Tránsito .....	91
3.3.3	Clima .....	92
3.3.4	Mediciones realizadas .....	93
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		96
4.1	Análisis de los tramos en Virginia Smart Road .....	96
4.1.1	Resultados de coeficiente de fricción con Trailer de rueda bloqueada .....	96
4.1.2	Resultados de coeficiente de fricción con DFTester .....	98
4.1.3	Resultados de macrotextura con CTmeter .....	99
4.1.4	Análisis del coeficiente F60 del IFI .....	101
4.1.4.1	Trailer de rueda bloqueada .....	101
4.1.4.2	DFTester .....	103
4.1.5	Conclusiones tramos Virginia Smart Road .....	105
4.2	Tramos en Aeropuerto .....	106



4.2.1	Análisis de la influencia en los resultados de Péndulo de Fricción .....	107
4.2.2	Análisis de la influencia en los resultados de F60 .....	109
4.3	Tramos en Autopista con tránsito elevado .....	111
4.3.1	Análisis comparativo entre los tramos 1 y 5 respecto al tránsito .....	112
4.3.2	Análisis respecto a la temperatura .....	116
4.3.3	Análisis del valor mínimo del coeficiente de fricción .....	117
4.3.4	Análisis del parámetro F60 del IFI .....	118
4.3.5	Análisis del Mu de Referencia .....	121
4.3.6	Desarrollo de modelos de evolución .....	123
4.3.6.1	Modelo de macrotextura .....	123
4.3.6.2	Modelo de coeficiente de fricción .....	127
4.3.6.3	Modelo de F60 .....	129
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	131
5.1	Conclusiones .....	131
5.1.1	Mediciones en Virginia Smart Road .....	131
5.1.2	Mediciones en Aeropuerto .....	132
5.1.3	Mediciones en Autopista con tránsito elevado .....	132
5.2	Recomendaciones .....	134
CAPÍTULO 6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	136
ANEXO		



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comportamiento teórico del coeficiente de fricción .....	2
Figura 2.1. Megatextura, macrotextura, microtextura .....	7
Figura 2.2. Coeficiente de fricción longitudinal .....	10
Figura 2.3. Coeficiente de fricción longitudinal vs % de rueda bloqueada .....	11
Figura 2.4. Coeficiente de fricción transversal .....	12
Figura 2.5. Equipo tráiler de rueda bloqueada .....	12
Figura 2.6. Equipo Scrim Tex .....	13
Figura 2.7. Equipo Mu Meter .....	14
Figura 2.8. Péndulo TRRL .....	15
Figura 2.9. Equipo Dynamic Friction Tester .....	16
Figura 2.10. Círculo de arena .....	18
Figura 2.11. Sensor laser montado en vehículo .....	18
Figura 2.12. Diferencias entre medición con Círculo de arena y Sensor laser ..	19
Figura 2.13. Circular Texture Meter .....	19
Figura 2.14. Variación teórica del coeficiente de fricción a lo largo de la vida en servicio .....	25
Figura 2.15. Modelo lineal para predecir el valor mínimo estival de coeficiente de fricción medido con Scrim .....	29
Figura 2.16. Modelo logarítmico para predecir el valor mínimo estival de coeficiente de fricción medido con Scrim .....	31
Figura 2.17. Evolución del CFT según Lorino, LCPC, Surf 2008 .....	32
Figura 2.18. Evolución de la macrotextura según Lorino, LCPC, Surf 2008 .....	36
Figura 2.19. Mediciones de fricción en dos secciones (realizadas con el equipo tráiler de rueda bloqueada), temperaturas y lluvias a lo largo del año ..	39



Figura 2.20. Superposición de la curva del modelo basado en el calendario Juliano y valores medidos con el equipo tráiler de rueda bloqueada .....	42
Figura 2.21. Variación del coeficiente de fricción en varios años .....	48
Figura 2.22. Personal realizando mediciones de campaña .....	65
Figura 2.23. Variación CFT Mu meter con la temperatura del agua en superficie .....	67
Figura 2.24. Factor de corrección por temperatura .....	68
Figura 2.25. Relación entre equipos Mu Meter en unidades Mu medido .....	70
Figura 2.26. Relación entre equipos Mu Meter en Mu Ref .....	71
Figura 3.1. Virginia Smart Road .....	77
Figura 3.2. Temperaturas promedio y medidas .....	77
Figura 3.3. Mediciones con Trailer de rueda bloqueada, sentido E, 64 Km/h ...	78
Figura 3.4. Mediciones con Trailer de rueda bloqueada, sentido W, 64 Km/h ..	80
Figura 3.5. Mediciones con DFTester, sentido E, 20 Km/h .....	80
Figura 3.6. Mediciones con DFTester, sentido W, 20 Km/h .....	81
Figura 3.7. Resultados de macrotextura con CTMeter, sentido E .....	82
Figura 3.8. Resultados de macrotextura con CTMeter, sentido W .....	82
Figura 3.9. Valores medidos de macrotextura HS (mm) .....	86
Figura 3.10. Valores de BPN medidos .....	86
Figura 3.11. Vista Autopista .....	87
Figura 3.12. Esquema de ubicación de los tramos .....	88
Figura 3.13. Distribución anual promedio de la temperatura del aire y de la precipitación .....	93
Figura 3.14. Variación de la macrotextura, tramos 1 y 5 .....	94
Figura 3.15. Variación del coeficiente de fricción, tramos 1 y 5 .....	95



Figura 4.1. Variación del SN con la temperatura .....	97
Figura 4.2. Variación del SN estimado con coef. DOT con la temperatura .....	98
Figura 4.3. Variación del SN estimado con coef. tesis de Rodriguez con la temperatura .....	98
Figura 4.6. Variación del coeficiente DFT con la temperatura .....	99
Figura 4.7. Variación de la macrotextura con la temperatura, para todos los tramos en conjunto .....	100
Figura 4.8. Variación de la macrotextura con la temperatura, considerando el tramo K en forma separada .....	101
Figura 4.9. Variación del F60, tramos sentido E .....	102
Figura 4.10. Variación del F60, tramos sentido W .....	102
Figura 4.11. Variación del F60 con la temperatura, Trailer de rueda bloqueada .....	103
Figura 4.12. Variación del F60, tramos sentido E .....	104
Figura 4.13. Variación del F60, tramos sentido W .....	104
Figura 4.14. Variación del F60 con la temperatura, DFTTester .....	105
Figura 4.15. Valores de BPN corregidos a 20 °C .....	108
Figura 4.16. Valores de BPN medidos versus temperatura del agua remanente .....	109
Figura 4.17. Valores de F60 con BPN medido .....	110
Figura 4.18. Valores de F60 con BPN corregido por temperatura .....	110
Figura 4.19. Valores de F60 versus temperatura del agua remanente .....	111
Figura 4.20. Variación de la macrotextura, tramos 1 y 5 .....	112
Figura 4.21. Variación del coeficiente de fricción, tramos 1 y 5 .....	113
Figura 4.22. Variación de HS con el TMDA acumulado .....	114
Figura 4.23. Variación de BPN con el TMDA acumulado .....	114



Figura 4.24. Variación de HS con el tránsito pesado acumulado .....	115
Figura 4.25. Variación de BPN con el tránsito pesado acumulado .....	115
Figura 4.26. Variación del F60 con los años .....	119
Figura 4.27. Variación del F60 con el TMDA acumulado .....	119
Figura 4.28. Variación del F60 con el tránsito pesado acumulado .....	120
Figura 4.29. Variación del Mu Ref con los años .....	121
Figura 4.30. Variación del Mu Ref con el TMDA acumulado .....	122
Figura 4.31. Variación del Mu Ref con el tránsito pesado acumulado .....	122
Figura 4.32. Mediciones de macrotextura y predicción del modelo .....	125
Figura 4.33. Evolución para una tasa de crecimiento de 2 %, dos intensidades de vehículos pesados por día, y tres valores iniciales de macrotextura .....	125
Figura 4.34. Evolución para dos tasas de crecimiento, 2 % y 4%, 30 vehículos pesados por día, y tres valores iniciales de macrotextura .....	126
Figura 4.35. Duración en años antes de alcanzar una macrotextura de 0.4 m .	127
Figura 4.36. Mediciones de coeficiente de fricción y predicción del modelo ....	128
Figura 4.37. Sensibilidad del modelo de evolución del coeficiente de fricción ..	129
Figura 4.38. Evolución del F60 calculado a partir de los modelos de macrotextura y coeficiente de fricción .....	130



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Coeficientes $a_0$ para el modelo de macrotextura .....	34
Tabla 2.2. Factores de corrección mensuales .....	44
Tabla 2.3. Constantes para obtención del IFI .....	64
Tabla 3.1. Características de las secciones de ensayo .....	76
Tabla 3.2. Temperaturas medidas en las secciones .....	78
Tabla 3.3. Resultados obtenidos en Aeropuerto .....	85
Tabla 3.4. Composición de la mezcla asfáltica tipo F10 .....	89
Tabla 3.5. Granulometría de la mezcla .....	89
Tabla 3.6. Características del Cemento asfáltico y el agregado grueso .....	90
Tabla 3.7. Distribución y composición del tránsito en porcentaje .....	91
Tabla 3.8. Volumen de tránsito y composición año 1999 .....	92
Tabla 3.9. Volumen de tránsito y composición año 2004 .....	92
Tabla 4.1. Resumen coeficientes de variación con la temperatura .....	106
Tabla 4.2. Resultados corregidos .....	107
Tabla 4.3. Influencia de la temperatura obtenida para cada tramo .....	109
Tabla 4.4. Mediciones con equipo Scrim Tex .....	117
Tabla 4.5. Variaciones en los parámetros .....	120





## LISTADO DE ABREVIATURAS

AIPCR	Asociación internacional permanente de los congresos de la ruta
AM	material de superficie mezcla asfáltica
ASTM	organismo normativo de Estados Unidos
BPN	resultados de coeficiente de fricción del Péndulo de Fricción
CFL	coeficiente de fricción longitudinal
CFT	coeficiente de fricción transversal
CPA	coeficiente de pulimento acelerado de los agregados
CTmeter	equipo laser puntual para medición de la macrotextura
CVD	número de vehículos pesados por día (tara mayor a 1.5 T)
DFT	equipo para medición del coeficiente de fricción
DOT	Departamento de transporte, Estados Unidos
F60	parámetro del IFI
FHWA	Administración federal de carreteras, Estados Unidos
Griptester	equipo para medición del coeficiente de fricción
HDM 4	modelo para el análisis técnico económico de carreteras
HS	resultados de macrotextura medidos con Círculo de Arena
IFI	índice de fricción internacional
LCPC	Laboratorio central de puentes y caminos, Francia
MTD	resultados de macrotextura medidos en forma volumétrica
MPD	resultados de macrotextura medidos con equipo laser
MSSC	coeficiente Scrim medio de verano
Mu meter	equipo para medición del coeficiente de fricción
Mu Ref	resultados de equipo Mu meter expresados como equipo de referencia
Scrim tex	equipo de medición del coeficiente de fricción y la macrotextura
SN	resultados de coeficiente de fricción del trailer de rueda bloqueada
Sp	parámetro del IFI
ST	material de superficie tratamiento superficial
TMDA	tránsito medio diario anual
TRRL	Laboratorio de investigación en transporte, Inglaterra



## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

La adherencia neumático calzada es un parámetro característico de la superficie del pavimento, que se encuentra fuertemente relacionado a la seguridad de circulación que tienen los usuarios que circulan por la ruta. La misma no es constante, sino que partiendo de un valor inicial va decreciendo hasta alcanzar un valor mínimo, el cual es función del nivel de tránsito, el tipo de superficie de rodamiento, el tipo de agregados pétreos, la configuración del tránsito, etc.

La adherencia que brinda una superficie de rodamiento al usuario no se mantiene constante a lo largo de la vida en servicio. Su magnitud depende de la variación de dos parámetros: la macrotextura de la superficie y el coeficiente de fricción.

La variación del coeficiente de fricción parecería seguir un patrón teórico formado por dos etapas, como el mostrado en la Figura 1.1. Durante la primera etapa, aproximadamente el primer año de servicio, el valor del coeficiente de fricción decrece rápidamente, es decir, sufre una pérdida inicial. Luego de ese período, en la segunda etapa, los valores se mantienen relativamente constantes, oscilando en torno a un “valor de equilibrio”. (LCPC, 1993) [1] (Del Val, 2010) [2]

El valor de equilibrio y el tiempo que se tarde en alcanzarlo dependerá del tránsito, el tipo de mezcla, los agregados y el clima. Durante ambas etapas existen variaciones reversibles asociadas a las estaciones del año, indicando mayores valores en invierno y menores en verano.

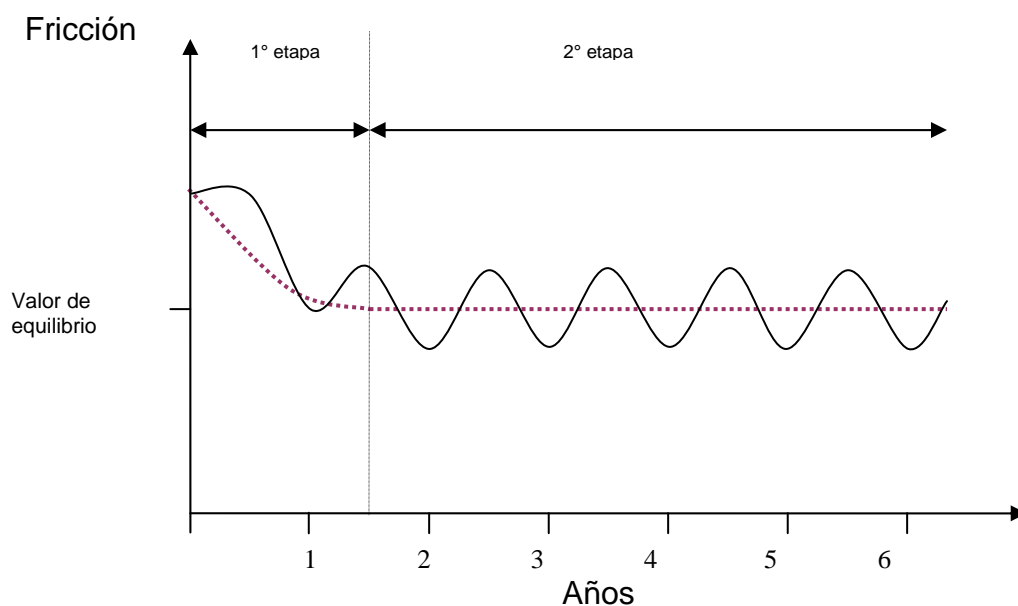


Figura 1.1. Comportamiento teórico del coeficiente de fricción

La macrotextura también modifica su valor inicial. Transversalmente al sentido de avance y luego de un tiempo bajo tránsito, empieza a diferenciarse la zona de rodada de la del centro del carril. Longitudinalmente, la macrotextura decrece hasta un valor mínimo que corresponde al máximo amasado de la mezcla de la carpeta de rodamiento. Los valores alcanzados por la macrotextura dependerán del tipo de carpeta, de los agregados empleados en la mezcla y del nivel de tránsito solicitante. (Hosking, 1992) [3]

Estos cambios de macrotextura también introducen variaciones en el resultado del coeficiente de fricción medido con equipos. La influencia será de distinta magnitud según sea el diseño mecánico del equipo, fundamentalmente del tipo de neumático y del caudal de agua de riego que utilice.

Existen en la bibliografía extranjera algunos modelos aislados para predecir esta evolución. Ellos se desarrollaron para ciertos equipos y para las condiciones particulares de regiones, climas y tránsito, valorando ambos parámetros: coeficiente de fricción y macrotextura, en forma independiente. No



existiendo ningún modelo que analice el IFI (índice de fricción internacional), sino que analizan por separado los dos parámetros que lo forman, fricción y textura, particularizados para distintos equipos de medición.

### **1.1 Descripción del problema a analizar**

Si bien el tema adherencia neumático calzada tiene amplia difusión en el mundo, y existen muchos equipos para su valoración, en Argentina no se le ha dado hasta hace unos años la debida consideración.

Las carpetas de rodamiento, fundamentalmente las carpetas asfálticas, eran diseñadas con mezclas asfálticas pensadas para satisfacer criterios estructurales, sin tener en cuenta al usuario y por consiguiente a la seguridad.

Recién a partir de la década del 90, cuando se implementó un Sistema de Concesión de rutas donde el Concesionario debía brindar un determinada calidad de servicio a los usuarios, controlada por indicadores de deterioro, comenzaron a incorporarse carpetas de rodamiento “especiales”, las cuales pasaron a ser diseñadas para satisfacer las necesidades de los usuarios, fundamentalmente en autopistas y carreteras rápidas con elevado tránsito. A partir de entonces los parámetros relacionados con la adherencia neumático calzada comenzaron a ser considerados.

Respecto a los equipamientos, la pionera ha sido la Dirección Nacional de Vialidad allá por los años 80, cuando incorporó a la repartición equipos Mu Meter, y empezó a utilizarlos en auscultaciones de su red. Luego, en el año 2004, la misma repartición adquirió un equipo Scrim con medidor de textura incorporado. A nivel de las Vialidades Provinciales no se ha realizado la incorporación de equipamiento, y a nivel empresas privadas solo dos equipos de alto rendimiento están incorporándose, mientras que si se han incorporado equipos Péndulo tipo TRRL de medición del coeficiente de fricción en forma puntual.



## **1.2 Objetivos específicos de la tesis**

El presente estudio tiene como objetivo principal cuantificar la variación que presenta la adherencia neumático calzada con la temperatura y con el tiempo en servicio bajo tránsito.

Particularmente se pretende arribar a modelos de comportamiento de la adherencia neumático calzada que permitan predecir dicha evolución en el tiempo, valorada a través de los parámetros individuales y del IFI, aplicados a carpetas de rodamiento en uso en Argentina. Donde los resultados estarán particularizados a los materiales y a las condiciones climáticas de Argentina.

## **1.3 Importancia de la misma**

El hecho de conocer la influencia que la temperatura tiene en los resultados obtenidos con los equipos de medición de la adherencia neumático calzada, hace que puedan implementarse factores de corrección en los mismos, de manera de tener resultados comparables obtenidos en cualquier época del año, y de esa manera reducir las posibles dispersiones en análisis de seguimiento de comportamiento en sistemas de administración de carreteras y en programas de seguimiento a largo plazo.

Además, con el desarrollo de modelos de evolución apropiados a los materiales y condiciones climáticas locales, las empresas pueden evaluar y prever el comportamiento futuro de las carpetas de rodamiento bajo la acción de las sollicitaciones del tránsito y el clima. De este modo, ajustando los diseños y utilizando materiales apropiados se reducirán fundamentalmente los costos del usuario y por sobre todo el riesgo de accidentes, aspectos muy importantes y de mucho peso en el balance económico de una obra vial.



#### **1.4 Secciones que componen la tesis**

La presente Tesis está formada por seis capítulos, en los cuales se abordan diferentes aspectos del trabajo de doctorado realizado.

En los capítulos 1 y 2 se realiza una revisión bibliográfica, en la que se describe el parámetro adherencia neumático calzada, y algunos equipos disponibles para la realización de mediciones, algunos de medición puntual apropiados para investigaciones, y otros de medición continua y a velocidad del tránsito, más adecuados para mediciones en grandes longitudes y en rutas en servicio.

En el capítulo 3 se presentan las situaciones disponibles para ser analizadas para cumplir con los objetivos de esta tesis, y de las cuales se dispone de resultados de campaña: Pista de Ensayos en Virginia, Estados Unidos, aeropuerto, y autopista con tránsito elevado.

En el capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos en los distintos escenarios. Los resultados obtenidos en la Pista de Ensayos de Virginia y los obtenidos en calzadas de aeropuerto, fueron utilizados para valorar la influencia de la temperatura en los resultados de coeficiente de fricción. Mientras que los obtenidos en autopista con tránsito elevado durante 11 años de servicio, fueron utilizados para el desarrollo de modelos de predicción del comportamiento de carpetas de rodamiento con mezclas tipo F10, construidas con agregados pétreos de Argentina y bajo las condiciones climáticas de la Ciudad de Buenos Aires.

Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas y se plantean posibles estudios futuros relacionados con esta tesis.

El capítulo 6 ha sido destinado a registrar la bibliografía consultada.



## **CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Aspectos de la superficie del pavimento involucrados**

La adherencia neumático calzada es una de las características superficiales del pavimento que tiene influencia en la seguridad del conductor, ya que permite:

- \* Reducir la distancia de frenado
- \* Mantener en todo momento la trayectoria deseada del vehículo

La adherencia neumático-calzada puede definirse como la capacidad de unión o contacto íntimo entre dichos elementos, de forma que de origen a una circulación segura del vehículo. En general el conductor es muy sensible a la ausencia o disminución de la adherencia que se produce cuando la superficie está mojada, con hielo, etc., existiendo deslizamiento del vehículo.

Como se expondrá con más detalle, la adherencia neumático calzada es suficiente, salvo casos excepcionales, sobre superficie seca, disminuyendo extraordinariamente en períodos de lluvia debido a la película de agua que se interpone entre el neumático y la calzada.

Las capas de rodamiento de las carreteras y, esencialmente los agregados, deben reunir las características adecuadas para cumplir las siguientes funciones básicas desde el punto de vista de la seguridad, (LCPC, 1993) [1]:

- \* Romper la película de agua procedente de la lluvia, con el objeto de asegurar el contacto íntimo entre el neumático y la calzada.
- \* Facilitar y contribuir al drenaje del agua existente bajo el neumático.
- \* Mantener en el tiempo las características adecuadas.

La primera de estas funciones depende, básicamente, de las características intrínsecas del árido: asperezas superficiales, así como de su permanencia en el tiempo bajo la acción del tránsito.

La segunda función citada depende fundamentalmente de la composición granulométrica de la capa de rodadura, así como a los posibles tratamientos que sobre ella se realicen, de los que puede ser un ejemplo el estriado o ranurado que se efectúa sobre pavimentos de hormigón.

Durante el Congreso Mundial de la AIPCR celebrado en Bruselas en 1987 se definieron tres bandas de textura: megatextura, macrotextura y microtextura. Figura 2.1. (AIPCR, 1987) [4]

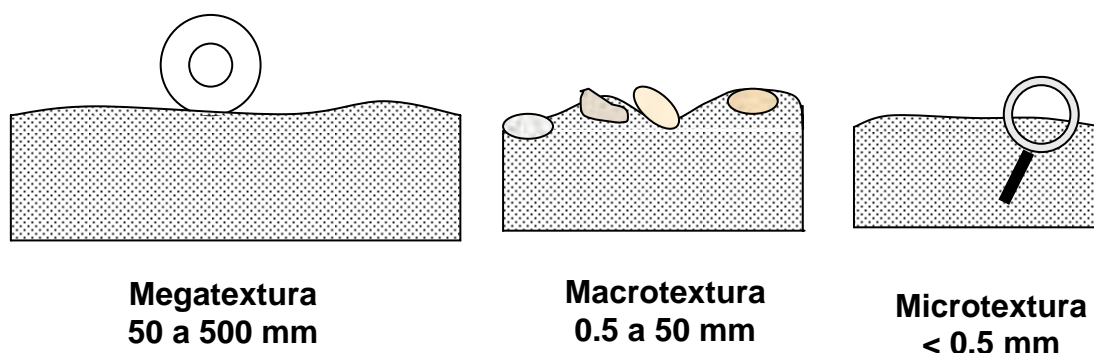


Figura 2.1. Megatextura, macrotextura, microtextura

La megatextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal entre 50 y 500 mm, del mismo orden que el neumático en contacto con el pavimento (a menudo originadas por bacheos y ondulaciones).

La macrotextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie en relación con una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal comprendidas entre 0.5 y 50 mm, o sea, en una escala del orden que los dibujos del neumático. Tiene como función contribuir al drenaje del agua en el área de contacto neumático pavimento, evitando así los riesgos de





hidroplaneo (pérdida de control del vehículo con la presencia de agua sobre la calzada).

La microtextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal inferiores a 0.5 mm. Este tipo de textura es la que hace al pavimento más o menos áspero, pero normalmente es tan pequeña que no puede observarse a simple vista.

Tras las consideraciones anteriores, es evidente que el empleo de áridos más o menos pulimentables o de diferentes composiciones mineralógicas, así como el diseño de granulometrías más o menos abiertas o cerradas, o con mayor o menor tamaño máximo de árido, etc., son factores que influyen sensiblemente en la textura superficial y, por consiguiente, en la capacidad de adherencia neumático calzada y, en definitiva, en la seguridad vial.

Es muy importante destacar que bajo la acción del tránsito, las características iniciales disminuyen con el transcurso del tiempo. Así, por ejemplo, se va produciendo el pulimento de los áridos, modificándose sensiblemente la microtextura superficial.

También, por lo general, la macrotextura disminuye paulatinamente, dificultando la evacuación de la película de agua procedente de lluvia hasta que, por debajo de un determinado umbral, el drenaje está limitado casi exclusivamente a los canales (dibujo) que constituyen la escultura del neumático.

Si la velocidad de circulación es elevada la capacidad de drenaje de agua es insuficiente, elevándose sensiblemente el riesgo de que la rueda patine o deslice al producirse la pérdida de contacto entre el neumático y la calzada. Obviamente, el riesgo de accidentalidad es aún mayor si en las anteriores



circunstancias se añaden nuevos factores negativos, como pueden ser circular con neumáticos desgastados, incrementar la velocidad, etc.

La adherencia neumático calzada se explica entonces por un conjunto de fenómenos complejos e interactivos que deben ser analizados tanto a nivel vehículo como a nivel pavimento.

## **2.2 Medición de la adherencia neumático calzada**

La adherencia neumático calzada se valora en forma indirecta a través de la medición de dos indicadores de la superficie del pavimento: el coeficiente de fricción y la macrotextura.

### **2.2.1. Medición del coeficiente de la fricción**

La resistencia al deslizamiento del pavimento es un valor crítico en la seguridad vial cuando el pavimento está mojado. La misma se determina midiendo el coeficiente de rozamiento entre el pavimento artificialmente mojado y una rueda de goma especial. También se puede considerar que es una forma indirecta de medir la parte más fina de la textura es decir, la microtextura, aunque la macrotextura también tiene un papel importante en el resultado por ser la que permite la evacuación del agua de la interfaz neumático pavimento.

El valor del coeficiente de rozamiento depende de una serie de factores, algunos inherentes a la carretera mientras que otros son responsabilidad del usuario (como la velocidad y el estado de los neumáticos del vehículo) o de la naturaleza (lluvia, nieve o hielo sobre la calzada, etc.). La demanda de rozamiento es función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera. A su vez la capacidad de responder a esa demanda es función del tipo y del estado del pavimento.

Los equipos que evalúan el coeficiente de rozamiento realizan los ensayos sobre el pavimento mojado (el equipo vierte agua de forma controlada) y a una velocidad constante. Las condiciones en que cada equipo realiza sus mediciones se encuentran perfectamente definidas (velocidad, tipo de neumático, espesor de película de agua, etc.). Cada equipo tiene fijadas distintas condiciones, es por eso que el resultado depende del tipo de equipo utilizado.

Los equipos de evaluación pueden medir coeficiente de fricción longitudinal (CFL) o coeficiente de fricción transversal (CFT).

Los equipos que determinan el coeficiente de fricción longitudinal CFL se componen básicamente de una rueda que gira a una velocidad angular reducida y se traslada con velocidad constante  $V$ . Lo que se mide es la fuerza de contacto  $F$  que se genera en la interface de contacto neumático calzada y que tiende a limitar el desplazamiento. El CFL simula una situación de “frenado de urgencia”. Figura 2.2.

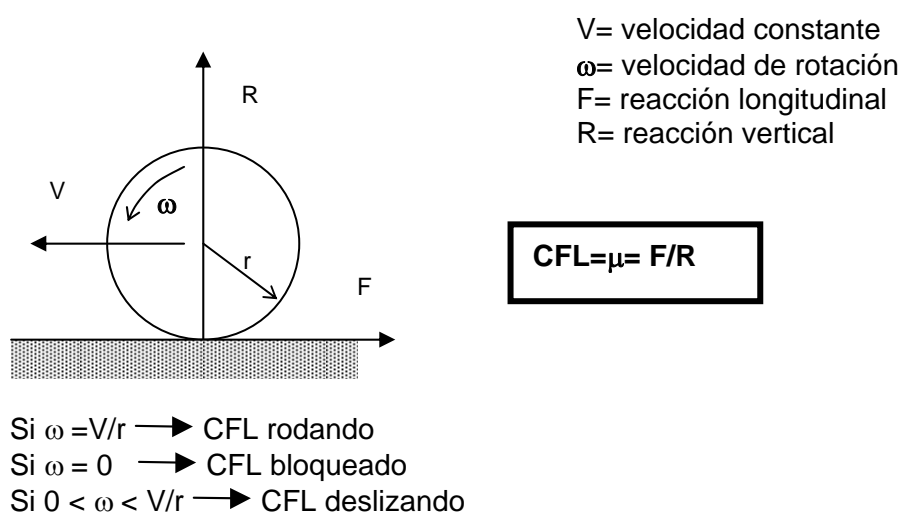


Figura 2.2. Coeficiente de fricción longitudinal

El CFL varía según el porcentaje de bloqueo de la rueda, llegando a su valor máximo cuando el porcentaje de rueda bloqueada se encuentra entre un 15% y

20%. Figura 2.3. Este comportamiento dio origen a la creación de los sistemas antibloqueo en la industria automotriz. (LCPC, 2005) [5].

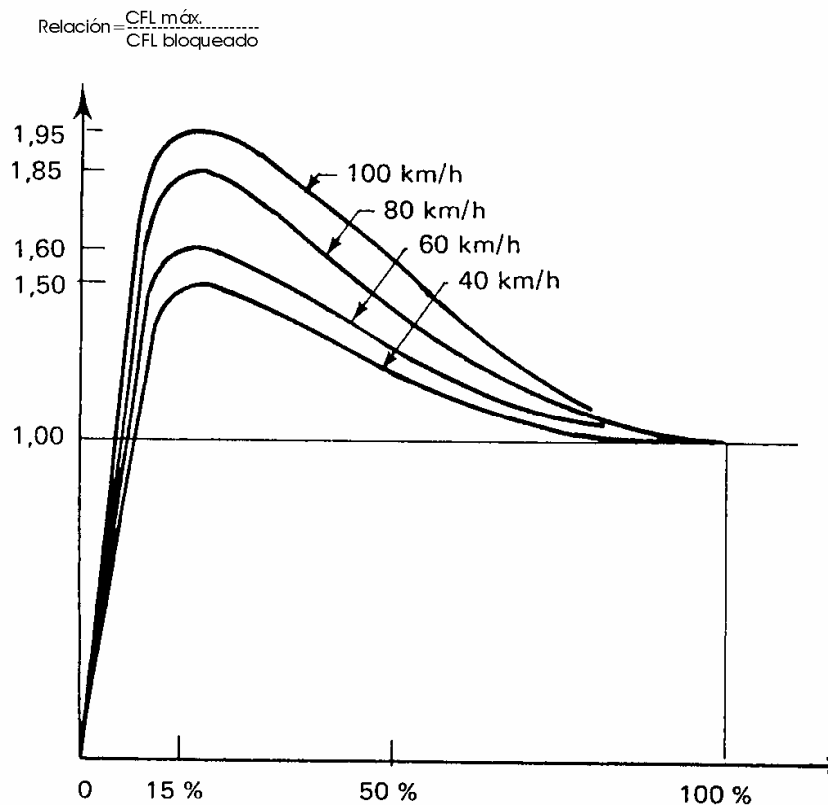


Figura 2.3. Coeficiente de fricción longitudinal vs. % de rueda bloqueada

Los equipos que determinan el coeficiente de fricción transversal CFT se componen básicamente de una rueda que posee un ángulo de deriva respecto al sentido de circulación, por lo tanto la rueda ejerce una fuerza para acomodarse paralela al sentido de avance. El CFT es la relación entre la fuerza  $N$ , perpendicular al plano de rotación de la rueda y la reacción  $R$ , normal al plano de apoyo debido al peso de la rueda. El coeficiente de fricción transversal CFT simula una situación de derrape del vehículo en curva. Figura 2.4.

$V$  = velocidad constante  
 $\theta$  = velocidad de deriva  
 $N$  = reacción transversal  
 $R$  = reacción vertical

$$CFT = \mu = N/R$$

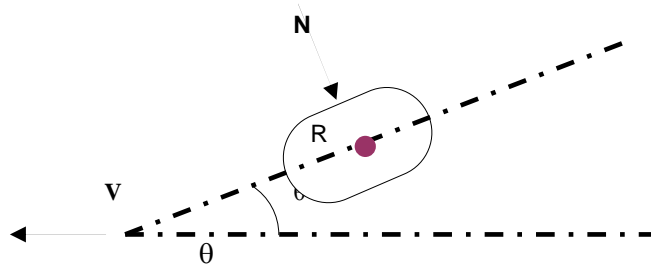


Figura 2.4. Coeficiente de fricción transversal

Existe una amplia variedad de equipos que miden el CFL, se describen aquí los que se utilizaron para realizar mediciones en el presente proyecto.

- Equipo trailer de rueda bloqueada, Figura 2.5



Figura 2.5. Equipo trailer de rueda bloqueada

- Origen: Estados Unidos

- Norma de ensayo ASTM E-274
- Mide CFL
- Neumáticos posibles de ser utilizados:
  - o E-501 (7 nervios)
  - o E-524 (liso)
- Rueda 100% bloqueada
- Velocidad estándar: 64 Km/h, puede medirse a otras velocidades
- Espesor de la película de agua: 0.64 mm

Este es el equipo más utilizado en los Estados Unidos. Mide la fuerza de fricción sobre una superficie húmeda cuando la rueda se bloquea, mientras el vehículo se desliza a velocidad constante. La rueda permanece bloqueada durante aproximadamente 1 segundo, y se informa el promedio de la fuerza medida en ese tiempo. El Valor de fricción es luego esa fuerza requerida para deslizar el neumático dividida por la carga efectiva sobre la rueda, multiplicada por 100.

- Equipo Scrim Tex, Figura 2.6



Figura 2.6. Equipo Scrim Tex

- Origen: inglés

- Neumático: liso
- Velocidad: 50 Km/h
- Espesor de la película de agua: 0.5 mm
- Ángulo de deriva: 20°
- Mide en forma conjunta CFT y macrotextura MPD,

En Argentina este equipo pertenece a Vialidad Nacional. El mismo se desplaza a velocidad constante sobre el tramo a medir, y posee una rueda medidora a cada lado del equipo en coincidencia con cada huella, que posee un ángulo de deriva de 20° y mide en forma continua el CFT. A corta distancia adelante del sistema de riego de agua posee un sistema láser para medición de la macrotextura.

- Equipo Mu Meter, Figura 2.7



Figura 2.7. Equipo Mu Meter

- Origen: inglés
- Trailer: liviano de tres ruedas



- Neumático: liso
- Velocidad: 60 Km/h
- Espesor de la película de agua: 1 mm
- Ángulo de deriva:  $15^\circ$
- Mide CFT

Este equipo pertenece a Vialidad Nacional, consiste en un tráiler liviano con dos ruedas medidoras, con un ángulo de desvío entre ambas de  $15^\circ$ . El equipo se desplaza a velocidad constante y mide en forma continua el CFT generado entre ambas ruedas de medición.

- Equipo Péndulo de Fricción tipo TRRL, Figura 2.8



Figura 2.8. Péndulo TRRL

- Origen: inglés
- Patín: caucho
- Velocidad estimada: 7 Km/h
- Superficie: húmeda



Este equipo posee un patín con superficie de caucho que roza sobre la superficie del pavimento y valora la energía consumida durante ese deslizamiento. Al ser de medición puntual, el mismo puede ser colocado en distintas posiciones de manera de medir sobre la superficie de la calzada en forma longitudinal o transversal al eje del camino.

- Equipo DFT (Dynamic Friction Tester), Figura 2.9
  - Norma de ensayo: ASTM E-1911
  - Velocidad: variable, hasta 90 Km/h
  - Superficie: húmeda

El equipo consiste en un disco horizontal que gira en un plano paralelo a la superficie de ensayo, y tiene tres patines de goma montados en la superficie del disco. Cuando la superficie de giro del disco alcanza una velocidad tangencial de 90 Km/h, se distribuye agua sobre la superficie y se baja el disco hasta hacer contacto con la superficie. Se mide la fuerza de torque que se genera hasta que el disco frena, como resultado de la fricción entre la superficie del pavimento y las gomas a varias velocidades: 20, 40, 60 y 80 Km/h.

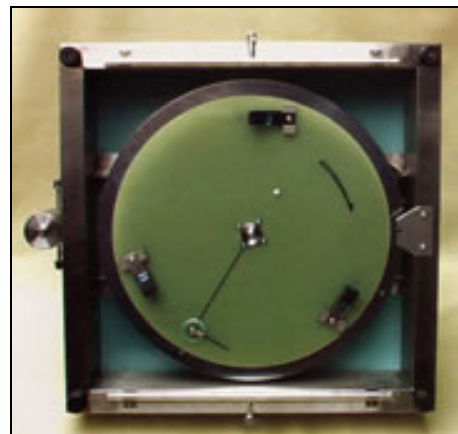
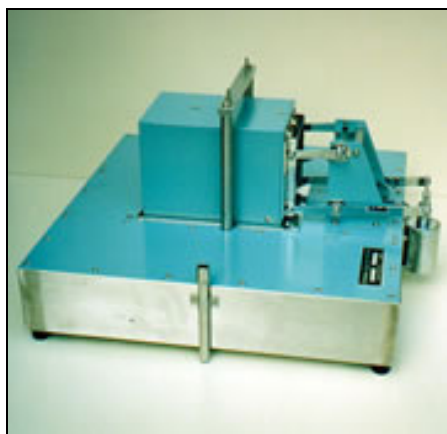


Figura 2.9. Equipo Dynamic Friction Tester



### 2.2.2. Medición de la macrotextura

La macrotextura del pavimento es un parámetro crítico en la seguridad de los usuarios. La misma influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interfase neumático pavimento y, de forma indirecta en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene gran importancia para la adecuada adherencia entre neumático y pavimento. Además, la macrotextura es la característica determinante en el nivel de ruido del tráfico, tanto del que perciben los ocupantes de los vehículos como el ruido de entorno que condiciona la calidad de vida de las zonas colindantes. En el aspecto económico, la textura del pavimento influye en el consumo de gasolina, en el deterioro de los vehículos y sobre todo en el desgaste de los neumáticos.

- Método del Círculo de arena

El método de ensayo conocido con el nombre de círculo ó parche de arena se viene empleando desde hace muchos años en la medida de textura de pavimentos. Se realiza esparciendo un volumen conocido de arena o esferas de vidrio sobre el pavimento en forma de círculo y midiendo su diámetro. Dividiendo luego el volumen de arena por la superficie del círculo obtenido se obtiene la profundidad media de arena, equivalente a la profundidad media de textura. El valor que representa la profundidad media de arena se define como la macrotextura MTD (mean texture depth). Figura 2.10.

En vista de que realmente se trata de un método basado en la medida de un volumen de material, el nombre apropiado es el de "método volumétrico". A pesar de que este ensayo es lento y puntual, es un método muy utilizado para medir la macrotextura. Se debe llevar a cabo con el pavimento seco y limpio, y en días sin viento. Cuando se trata de determinar el nivel de cumplimiento de la especificación de textura de un pavimento nuevo, el ensayo se debe realizar antes de la apertura al tráfico.



Figura 2.10. Círculo de arena

- Sensores laser

La medición sin contacto se realiza con sensores laser. Estos sensores pueden formar parte del mismo equipo de medición del coeficiente de fricción, como en el caso del Scrim tex (Figura 2.6); o pueden estar montados en barras o vehículos independientes. Figura 2.11.

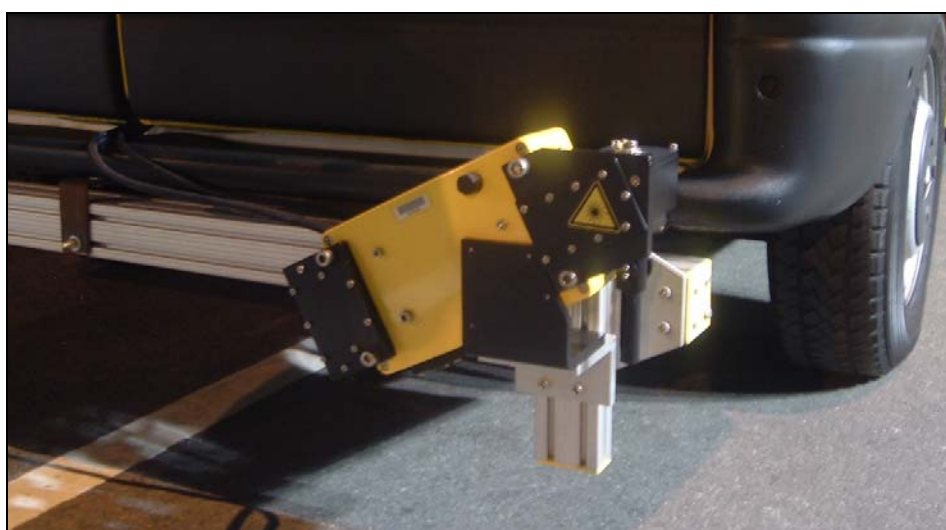


Figura 2.11. Sensor laser montado en vehículo

Estos equipos valoran la macrotextura en una línea, y el valor medido se expresa como MPD (mean profile depth). Sus resultados son correlacionados con MTD a partir de ecuaciones de “correlación”. Figura 2.12.

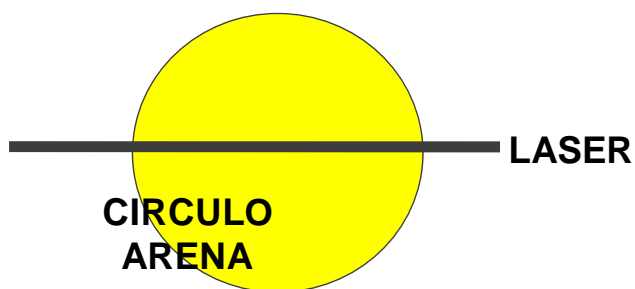


Figura 2.12. Diferencias entre medición con Circulo de Arena y Sensor Laser

- Circular Texture Meter

Este es un equipo liviano de medición puntual. El mismo tiene un sensor laser montado en un brazo que gira, relevando una superficie de 890 mm de diámetro, Figura 2.13. El perfil es medido en la misma circunferencia que el DFT usa para medir la fricción, y se obtiene como resultado el promedio de las mayores profundidades que se encuentran en 8 segmentos incluidos en el círculo de medición. Pueden ser calculados dos índices: MPD y RMS.



Figura 2.13. Circular Texture Meter



### 2.2.3. Índice de Fricción Internacional

Tradicionalmente, se ha venido caracterizando el pavimento por el valor de un coeficiente de fricción, determinado mediante equipos y ensayos más o menos modernos, y mejor o peor adaptados a las condiciones actuales de circulación y de los pavimentos. Hay diferentes formas de medir este coeficiente y las unidades en que se expresan son muy variadas, lo que hace que sus resultados sean difícilmente comparables y se dificulte el intercambio de experiencias.

Esta situación, es la que ha inducido a considerar necesario armonizar la práctica internacional en este tema. Por este motivo, se realizó un experimento internacional organizado por la AIPCR (Asociación Internacional Permanente de los Congresos de la Ruta), con el objetivo de establecer un único índice que represente características relacionadas con la adherencia neumático pavimento que tanta influencia tiene en la seguridad vial. La finalidad del Experimento fue la comparación y armonización de los numerosos métodos que se utilizan para evaluar la textura y la resistencia al deslizamiento en diferentes países, cuyas conclusiones fueron publicadas en 1995. (AIPCR, 1995) [6]. Los objetivos planteados para cumplir ese fin fueron:

- Desarrollar y valorar relaciones entre las medidas de la fricción y la textura tomadas con distintos equipos, variando las condiciones físicas de ensayo: textura, velocidad, ángulo de deriva, neumático de ensayo, materiales, clima, etc.
- Cuantificar la relación entre las medidas de la fricción y la textura tomadas con equipos distintos en condiciones específicas, para facilitar el intercambio y la armonización de la información técnica.
- Determinar la repetibilidad y los errores de medidas propios de los equipos. Evaluar el número de muestras y la frecuencia de muestreo



que requieren los distintos métodos para alcanzar una exactitud adecuada.

- Establecer una escala internacional de fricción a la que puedan referirse todos los equipos y evaluar su aptitud para determinar valores en esta escala.

En este Experimento Internacional se consiguió representar en un solo índice, el “Índice Internacional de Fricción” (IFI), las características relacionadas con la seguridad vial en condiciones de frenado. El IFI consta de dos números procedentes de dos medidas, una de fricción y otra de textura. Este par de números que define el IFI debería utilizarse en cualquier situación relativa a la adherencia neumático-calzada, como estudios de accidentes, inspecciones para la gestión de la conservación, explotación aeroportuaria, etc.

Se han establecido también las constantes con las cuales cada uno de los equipos participantes puede estimar los valores de referencia del IFI. Como consecuencia de esto, cualquier equipo de medida de la fricción de los participantes en el Experimento, o los que se sometan a un proceso de correlación con alguno de los que participaron, podrá estimar valores de la fricción en escala IFI, mediante sus propias medidas de la fricción y una medida de la textura.

El IFI puede describirse como una escala de referencia, de aplicación universal, de la fricción y de la macrotextura de un pavimento (ASTM E 1960) [7].

El IFI viene entonces indicado por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma:

IFI (F60, Sp)

donde:      F60    depende de la fricción y de la macrotextura

Sp    depende únicamente de las características de la  
macrotextura de la superficie



Las ecuaciones que relacionan estos parámetros F60 y Sp con las mediciones de los distintos equipos son:

$$Sp = a + b * T$$

$$F60 = A + B * FR60 + C * T$$

$$FR60 = F * e^{((S-60)/Sp)}$$

donde: T medición de la macrotextura

F medición de fricción

S velocidad de deslizamiento de la rueda

Las constantes "a y b" dependen del equipo con que se determina la macrotextura

Las constantes "A, B y C" del equipo con que se mide la fricción, la constante C es la que valora el tipo de neumático que utiliza el equipo, la misma vale cero para neumáticos lisos.

En la publicación de la AIPCR se indican las constantes halladas para todos los equipos participantes del Experimento, con las que puede calcularse el IFI. Como consecuencia de esto, cualquier equipo de medida de la fricción de los participantes en el Experimento, o los que se sometan a un proceso de correlación con alguno de los que participaron, podrá estimar valores de la fricción en escala IFI, mediante sus propias medidas de la fricción y una medida de la textura.

Según está indicado en la publicación de la AIPCR todo equipo que no participó del Experimento debe ser calibrado para poder ser luego utilizado para determinar el IFI. El procedimiento de calibración debe ser realizado con alguno de los equipos que participaron del Experimento.

Los pasos a seguir para determinar el IFI de una sección de camino son los siguientes:



1. realizar la medición de macrotextura "T" y de coeficiente de fricción "F", con algunos de los equipos participantes del Experimento o correlacionados.
2. tomar las constantes a y b del equipo de macrotextura (de la publicación de la AIPCR, y calcular Sp
3. en función del equipo de fricción empleado, de la velocidad de medición y del ángulo de deriva del neumático, calcular S. Donde S es:
  - la velocidad del equipo durante el ensayo, para equipos con rueda bloqueada,
  - la velocidad del equipo durante el ensayo multiplicada por el porcentaje de deslizamiento, para equipos con rueda parcialmente bloqueada, y
  - la velocidad del equipo durante el ensayo multiplicada por el seno del ángulo de deriva, para equipos con rueda oblicua.
4. calcular FR60
$$FR60 = F * e^{((S-60)/Sp)}$$
tomar las constantes A, B y C del equipo de fricción, y calcular F60
$$F60 = A + B * FR\ 60 + C * T$$
5. expresar el IFI obtenido en (F60 , Sp)





### 2.3 Variaciones en el tiempo

La adherencia del pavimento varía con el transcurso del tiempo. Es posible distinguir variaciones permanentes o irreversibles, ligadas al pulimento de los áridos por acción de la circulación de los vehículos y al amasado o compactación de la mezcla por acción de las cargas, y variaciones estacionales o reversibles atribuidas a cambios reversibles de la microtextura con las condiciones climáticas (efectos de la lluvia y la temperatura). Siendo el análisis de estas variaciones el objeto del presente trabajo.

La adherencia neumático calzada, como se dijo anteriormente, no se mantiene constante. Figura 2.14. Su valor depende de las variaciones del coeficiente de fricción y de la macrotextura. (Echaveguren, 2008) [8] (Gimenez Guspi, 2002) [9].

El coeficiente de fricción varía con el tiempo. Según la experiencia de otros países, dicha variación parecería seguir el siguiente modelo teórico:

- Al inicio de su vida en servicio, recién finalizada la obra, el valor es bajo debido a que los agregados se encuentran recubiertos con una delgada película de asfalto.
- Una vez que esa película se desgasta el valor del coeficiente de fricción tiene un incremento llegando al valor máximo que puede brindar esa superficie.
- Durante aproximadamente el primer año de servicio, el valor del coeficiente de fricción decrece rápidamente, es decir, sufre una pérdida inicial.
- Luego de ese período, en la segunda etapa, los valores se mantienen relativamente constantes, oscilando en torno a un “valor de equilibrio”. El valor de equilibrio y el tiempo que se tarde en alcanzarlo dependerá del tránsito, el tipo de mezcla, los agregados y el clima.
- Durante ambas etapas existen variaciones reversibles asociadas a las estaciones del año, dando mayores valores en invierno y menores en

verano (LCPC nº 185) [1] (Brillet y Gothié, 1983) [10] (AASHTO, 2008) [11] (Highway Agency HD 28/04, 2004) [13] (TYROSAFE Project, 2010) [14].

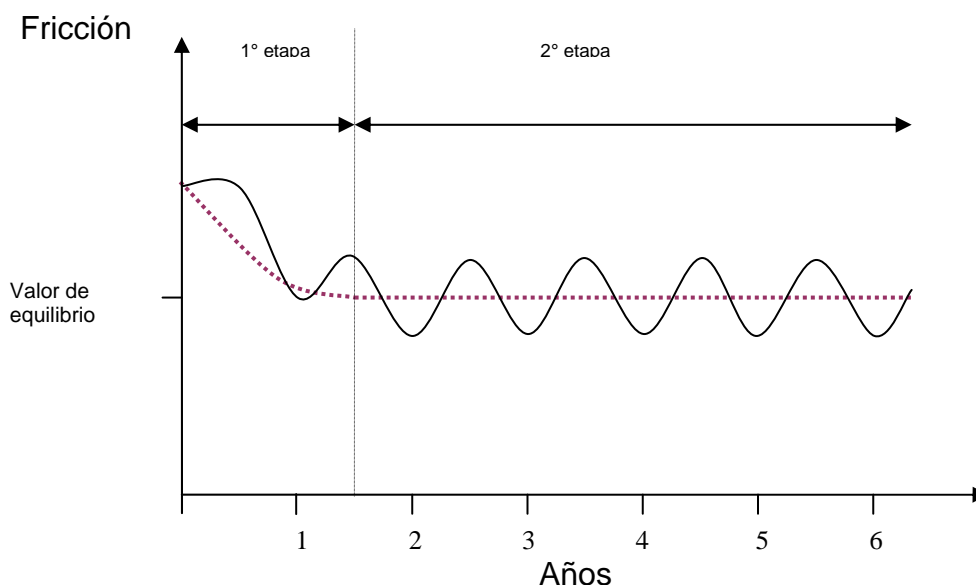


Figura 2.14. Variación teórica del coeficiente de fricción a lo largo de la vida de servicio

La macrotextura también modifica su valor inicial con el paso del tiempo y fundamentalmente del tránsito:

- Transversalmente al sentido de avance, luego de un tiempo empieza a diferenciarse la zona de rodada de la del centro del carril.
- Longitudinalmente, la macrotextura decrece hasta un valor mínimo que corresponde al máximo amasado de la superficie. Los valores alcanzados por la macrotextura dependerán del tipo de carpeta, de los áridos empleados en la mezcla y del nivel de tránsito solicitante.

### 2.3.1. Variación permanente del coeficiente de fricción

La variación del coeficiente de fricción depende de la variación de la macrotextura y de la pérdida de la microtextura superficial de los agregados



(pulimento). Estos procesos se asocian a la acción del tránsito y al clima.

Es sabido que los agregados de la superficie del pavimento son pulidos por la acción del tránsito, particularmente por los vehículos comerciales. Cuando se usan agregados muy susceptibles al pulimento puede producirse una caída del valor de la resistencia al deslizamiento hasta un punto donde se torne necesaria la repavimentación, antes de que la superficie haya agotado todo su potencial estructural. Consecuentemente, los agregados usados en superficies nuevas son elegidos basándose en su habilidad para resistir el pulimento, determinando su Coeficiente de Pulimento Acelerado a través del ensayo del mismo nombre, CPA.

La habilidad de los agregados para resistir al pulimento se debe a los siguientes factores, (Hosking, 1992) [3]:

- Composición y dureza individual de los granos: estos proveen la resistencia al desgaste necesaria para que un agregado sea durable.
- Granos de distinta dureza: cuando hay dos o más minerales, se forman planos o superficies de falla preferenciales, creando de este modo microtextura.
- Porosidad: la microtextura es generada por huecos en la superficie del agregado.
- Distribución y vinculación de granos: si los granos que están débilmente cementados por una matriz más blanda que ellos se pulen, pueden ser removidos por la acción del tránsito, renovando así la microtextura.

El coeficiente de fricción va variando su valor desde el momento de la puesta en servicio del pavimento, este deterioro será más o menos acelerado dependiendo del tipo de mezcla, del clima y del tránsito que lo solicita. Luego de un cierto período estos parámetros alcanzan un cierto “equilibrio”, cuyo valor depende del clima, el tránsito y el tipo de agregados.



Se presentan aquí distintos modelos de distintos orígenes, obtenidos de la bibliografía: utilizado en el Programa HDM 4, desarrollados en el Transport Research Laboratory, y desarrollado en el Laboratorio Central de Puentes y Caminos.

#### 2.3.1.1. Modelo HDM 4

El modelo propuesto para valorar la pérdida de la resistencia al deslizamiento propone: una pérdida anual calculada en función al tránsito, y un valor mínimo del coeficiente de fricción en el período de análisis limitado a un valor fijo. (HDM 4, 2000) [15]

Para el cálculo de la pérdida anual se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta SFC_{50} = K_{sfc} a_0 \text{ MAX}[0, \Delta CVD]$$

Donde:

$\Delta SFC_{50}$  = variación del coeficiente de fricción transversal durante el período de análisis anual, medidos a 50 km/h, con el equipo Scrim.

$\Delta CVD$  = incremento anual en la flota de vehículos pesados (veh/linea/día)

$K_{sfc}$  = factor de calibración para la resistencia al deslizamiento, modificable por el usuario.

$a_0$  = coeficiente que depende del tipo de capa de superficie, por defecto los valores indicados en el HDM 4 son todos iguales a:  $- 0.663 \times 10^{-4}$ .

El valor mínimo del coeficiente de fricción al final del análisis anual se calcula como el valor anterior menos la variación anual, pero limitado a un valor mínimo de coeficiente de fricción de 0.35, como se muestra en la siguiente expresión:



$$SFC_{50b} = \text{MAX}[(SFC_{50a} + \Delta SFC_{50}), 0.35]$$

Donde:

$SFC_{50b}$  = Coeficiente de rozamiento transversal, medido a 50 km/h, al final del análisis anual

$SFC_{50a}$  = Coeficiente de rozamiento transversal, medido a 50 km/h, al comienzo del análisis anual.

$\Delta SFC_{50}$  = Cambios incrementales en el coeficiente de rozamiento transversal, medido a 50 km/h, durante el análisis anual.

0.35 = Valor adoptado como mínimo en el modelo HDM 4

#### 2.3.1.2. Modelos Transport Research Laboratory

A continuación se exponen dos modelos del Transport Research Laboratory (TRL) para predecir el valor mínimo de fricción que tendrá la superficie del camino (valor que el modelo del HDM 4 fue elegido como fijo e igual 0.35). (Roe-SA Hartshorne, 1994) [16]

A principios de 1970, se estableció una relación para predecir la resistencia al deslizamiento (medida como coeficiente de rozamiento transversal de verano) a partir del Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA) o Polish Stone Value (PSV) de los agregados y el nivel de tráfico esperado en términos de Número de Vehículos Pesados por carril por día (CVD). Esto fue usado como base para definir las especificaciones en la construcción de nuevas rutas. (Szatkowski and Hosking, 1972) [17]

Por comodidad se designará al Coeficiente de Pulimento Acelerado con las siglas CPA y al Número de Vehículos pesados por carril por día como CVD por analogía con el modelo del HDM 4.



En este modelo denominado “lineal”, se considera que el valor de equilibrio está representado por el del “coeficiente medio Scrim de verano” (MSSC) que es el promedio de tres o más mediciones hechas con el equipo Scrim, realizadas en el mismo tramo, durante el período de verano. Es conocido como “coeficiente Scrim de equilibrio”.

La relación es la siguiente, graficada en la Figura 2.15:

$$\text{MSSC} = 0.98 \times 10^{-2} \times \text{CPA} - 0.664 \times 10^{-4} \times \text{CVD} + K$$

Donde:

MSSC= coeficiente Scrim de verano

CPA= coeficiente de pulimento acelerado del agregado

CVD= vehículos pesados por carril por día (se define como vehículo comercial a todo aquel que supere las 1.5 toneladas descargado).

K= coeficientes de ajuste. Según Szatkowski and Hosking, 1972, K=0.033, obtenido en base a experiencias de mediciones sobre tramos reales.

Se observó que, en ciertas circunstancias, la resistencia al deslizamiento calculada en la práctica no concordaba con la establecida sobre la base de las relaciones CPA-CVD planteadas, sobre todo para tránsitos elevados. Algunos agregados se comportaban mejor que lo esperado y otros presentaban un mayor pulimento. Esto no es extraño, dado que ninguna relación derivada de datos físicos es un modelo ideal y no se puede adaptar exactamente a todas las situaciones. Sin embargo las discrepancias son motivo de preocupación.

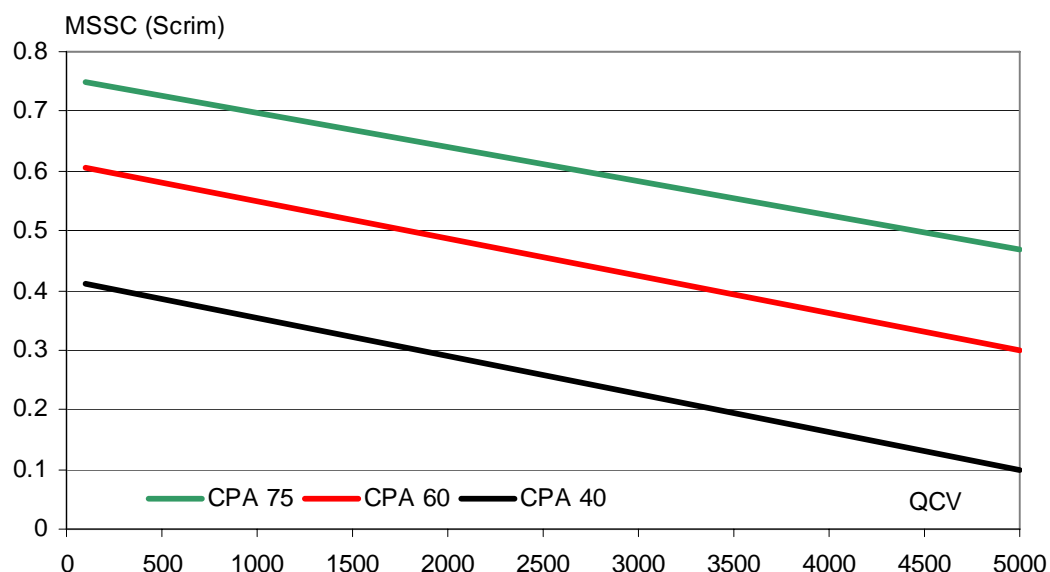


Figura 2.15. Modelo lineal para predecir el valor mínimo estival de coeficiente de fricción medido con Scrim

Para solucionar los inconvenientes del modelo anterior, se propuso una relación logarítmica entre el tránsito y la resistencia al deslizamiento. La nueva relación planteada tiene la siguiente forma:

$$\text{MSSC} = [a \times \text{CPA}] - [b \times \ln(\text{CVD})] + k$$

Donde:

MSSC= coeficiente Scrim de verano

CPA= coeficiente de pulimento acelerado

CVD=vehículos comerciales pesados por carril por día

a, b, k = coeficientes de ajuste. Según Szatkowski and Hosking, 1972,

$a = 6.18 \times 10^{-3}$ ,  $b = 2.25 \times 10^{-2}$  y  $k = 0.252$ .

En la Figura 2.16 se observa el modelo logarítmico propuesto, para tres tipos de agregados pétreos identificados por su CPA. Este nuevo modelo introdujo importantes mejoras en la predicción de la resistencia al deslizamiento para tránsitos elevados. Por este motivo, en el TRRL, ha sido adoptado para fijar nuevas especificaciones de fricción en el Reino Unido. (HD 28/04, 2004) [12].

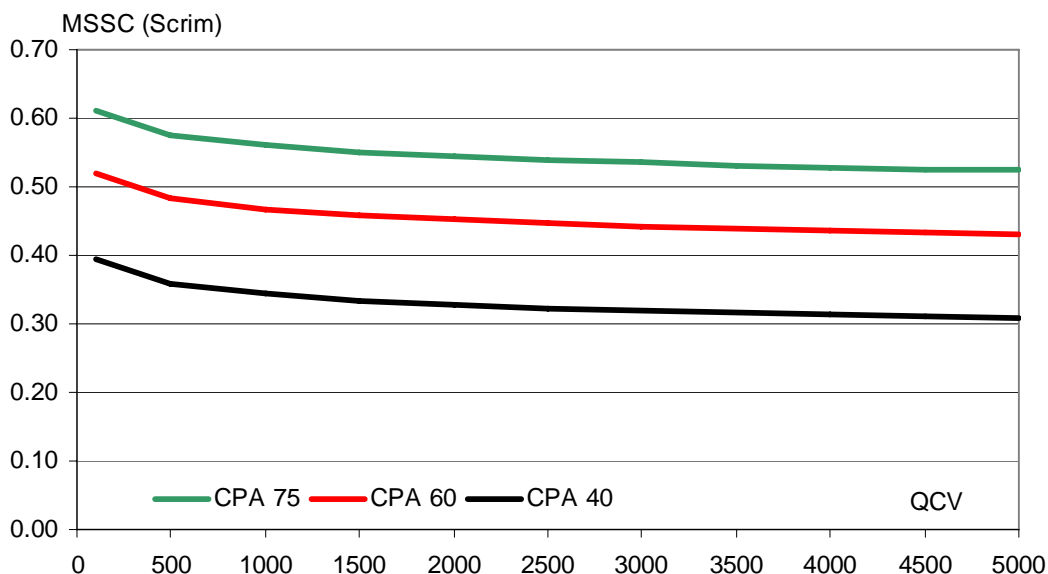


Figura 2.16. Modelo logarítmico para predecir el valor mínimo estival de coeficiente de fricción medido con Scrim

### 2.3.1.3. Evolución según el Laboratorio Central de Puentes y Caminos

En el Simposio SURF 2008 realizado en Slovenia, el Investigador del Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC) Tristán Lorino presentó la evolución de los parámetros relacionados con la adherencia neumático calzada, observada en el análisis de la base de datos Argusbase. En dicha base se encuentran los resultados de las campañas anuales de mediciones de los parámetros macrotextura y coeficiente de fricción realizadas en la red de principal de autopistas con peaje del sur de Francia. (Lorino, 2008) [18].

Los resultados corresponden a 43200 secciones de 100 metros de longitud con los siguientes tipos de carpeta de rodamiento:

- 62% con mezclas asfálticas discontinuas (SAC), en su mayoría con tamaño de agregados 0/14 mm.
- 33% con carpetas asfálticas muy delgadas (VTAC), en su mayoría con tamaño de agregados 0/10 mm.
- 5% con concreto asfáltico drenante (PAC), en su mayoría con tamaño de agregados 0/10 mm.



El estudio comprendió el análisis de resultados de coeficiente de fricción transversal medido con equipo Scrim, y las edades de las carpetas de rodamiento se encuentran entre 1 y 15 años.

En la Figura 2.17 se observa la evolución para los tres tipos de mezclas asfálticas, la misma fue tomada de la publicación citada, donde no se muestra ecuación que la represente.

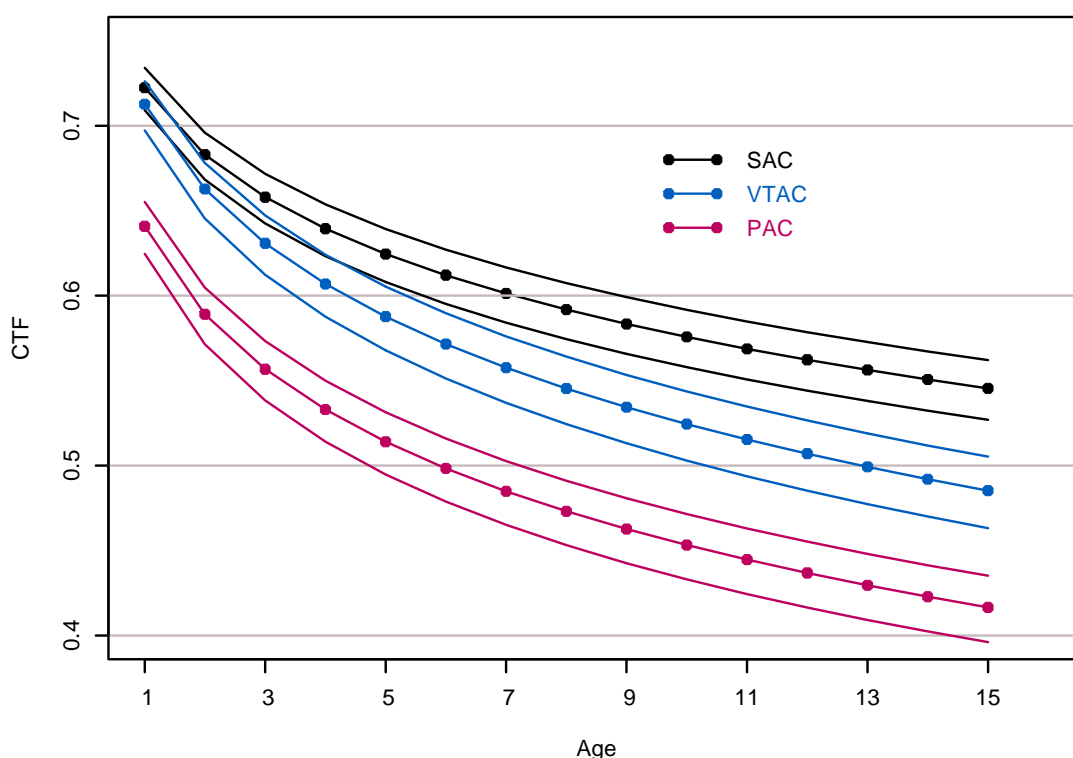


Figura 2.17. Evolución del CFT según Lorino, LCPC, Surf 2008

### 2.3.2. Variación permanente de la textura

El valor de textura de un pavimento recién ejecutado está asociado con el tipo de capa que se trate, el tamaño de los áridos empleados y el procedimiento de fabricación y extendido.

Con el tiempo, a consecuencia del uso del pavimento por los vehículos, la textura va modificando su valor inicial. Transversalmente al sentido de avance,



la textura en la zona de rodada y en el centro del carril se va diferenciando. Mientras en el centro del carril apenas se modifica el valor inicial, en la zona de rodada va disminuyendo. La magnitud de la diferencia (a veces muy significativa) es, en general, un indicador de la edad del pavimento y/o de su comportamiento.

Longitudinalmente la velocidad de evolución de la textura es función del valor inicial, valores iniciales pequeños disminuyen más despacio que valores iniciales más elevados. Con el paso del tiempo tanto las texturas bajas (0.3 - 0.7 mm) como las elevadas (0.7 - 2.0 mm) decrecen hasta un valor mínimo, que corresponde al momento de máximo amasado de la superficie sin pérdida de estructura, pérdida que comienza con la suelta de áridos. A partir de ese mínimo la macrotextura comienza a crecer y tiende a hacerlo muy rápidamente hasta que se alcanza un máximo a partir del cual ya no tiene sentido hablar de macrotextura de la capa, pasando a formar parte de la megatextura.

En capas delgadas tipo lechada puede suceder que la pérdida de textura signifique la desaparición de la capa o por lo menos de sus efectos favorables, quedando al descubierto la capa inferior que fue cubierta con la capa delgada. Se puede decir que la capa de rodadura ha agotado su misión.

Se presentan aquí distintos modelos de distintos orígenes, obtenidos de la bibliografía: utilizado en el Programa HDM 4, y desarrollado en el Laboratorio Central de Puentes y Caminos.

#### 2.3.2.1. Modelo de Pérdida incremental de macrotextura

Cenek y Griffith-Jones propusieron un modelo incremental para evaluar la pérdida de macrotextura. Este modelo fue adoptado en el HDM 4. (HDM 4, 2000) [15]. El modelo tiene la siguiente forma:



$$\Delta TD = K_{td} [ITD - TD_a - a_0 ITD \log_{10} (10^{[(ITD-TD_a) / (a_0 ITD)]} + \Delta NELV)]$$

donde:

$\Delta TD$ : pérdida incremental en la macrotextura medida con parche de arena durante el análisis anual (mm).

ITD: profundidad de textura de la superficie al momento de su construcción (mm) (macrotextura inicial).

$TD_a$ : profundidad de textura al comienzo del año de análisis (mm).

$\Delta NELV$ : número equivalente de vehículos livianos pasantes durante el período anual de análisis (un camión pesado o un colectivo pesado equivale a 10 NELV, un vehículo liviano es igual a 1)

$K_{td}$ : factor de calibración para profundidad de textura.

$a_0$  coeficiente que depende del tipo de material de superficie.

En la Tabla 2.1. se indican los valores por defecto para  $a_0$ . También se incluyen valores de profundidad de textura inicial que son usados por defecto cuando se repone la superficie del pavimento. Este último parámetro puede ser reemplazado por valores definidos por los usuarios.

La profundidad de textura al final del año de análisis está dada por la siguiente relación:

$$TD_b = \text{MAX} [(TD_a + \Delta TD), 0.1]$$

Donde:

$TD_b$ = profundidad de textura al final del análisis anual

$TD_a$ = profundidad de textura al inicio del año de análisis

$\Delta TD$ = cambios incrementales en la profundidad de textura durante el año de análisis

0.1= valor adoptado como mínimo en HDM 4 [mm]

Este modelo propone que la pérdida es función principalmente del número de vehículos livianos y del tipo de superficie valorado a través del coeficiente  $a_0$ . El valor mínimo se plantea como fijo (0.1 mm).

		MACROTEXTURA		
Tipo de Superficie	Material de la Superficie	Descripción	Parámetros	
			ITD	$a_0$
AM	AC	Concreto asfáltico	0.7	0.005
	HRA	Concreto asfáltico en caliente	0.7	0.005
	PMA	Asfalto modificado con polímeros	0.7	0.005
	RAC	Concreto asfáltico con caucho	0.7	0.005
	CM	Mezcla bituminosa en frío (cold mix)	0.7	0.005
	SMA	Stone mastic asphalt	0.7	0.005
	PA	Mezcla porosa	1.5	0.008
ST	SBSD	Tratamiento bituminoso superficial simple	2.5	0.12
	DBSD	Tratamiento bituminoso superficial doble	2.5	0.12
	CAPE	Capa de sellado	0.7	0.006
	SL	Slurry seal	0.7	0.006
	PM	Macadam de penetración	1.5	0.008

Tabla 2.1. Coeficientes  $a_0$  para el modelo de macrotextura

#### 2.3.2.2. Evolución según el LCPC

El análisis de la base de datos Argusbase, presentado en el Surf 2008 por Tristán Lorino, muestra la evolución de los parámetros macrotextura y coeficiente de fricción a partir de mediciones periódicas realizadas en la red de principal de autopistas con peaje del sur de Francia. (Lorino, 2008) [18].

Los resultados de macrotextura corresponden a 36500 secciones de 100 metros de longitud con los siguientes tipos de carpeta de rodamiento: mezclas asfálticas discontinuas (SAC), carpetas asfálticas muy delgadas (VTAC), y concreto asfáltico drenante (PAC).

El estudio comprendió el análisis de resultados de macrotextura medidos con equipo laser, y las edades de las carpetas de rodamiento se encuentran entre 1 y 15 años.

En la Figura 2.18 se observa la evolución para dos tipos de mezclas asfálticas, la misma fue tomada de la publicación citada, donde no se muestra ecuación que la represente.

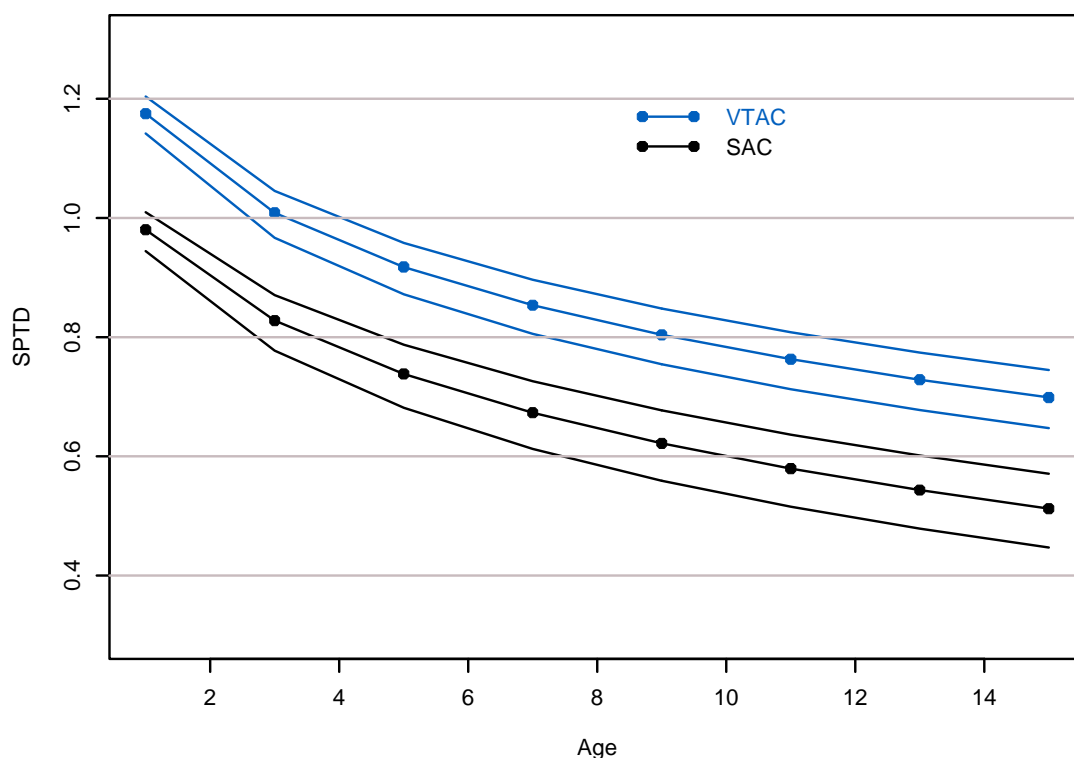


Figura 2.18. Evolución de la macrotextura según Lorino, LCPC, Surf 2008

### 2.3.3. Variación estacional del Coeficiente de Fricción

En investigaciones llevadas a cabo en el Reino Unido en 1931, se observó que la resistencia al deslizamiento del pavimento húmedo puede variar significativamente de una estación a otra e intermitentemente dentro de una estación dada. (Highway Agency, 2004) [12]. Después de este resultado, surgieron observaciones similares de estudios hechos en numerosos países. Hoy en día, aún se desconoce el mecanismo que controla las variaciones estacionales de resistencia al deslizamiento. Sin embargo, se tienen algunos conocimientos empíricos del proceso.



Las experiencias se han realizado en países del Hemisferio Norte, con climas con heladas y nieve durante el invierno y secos en verano y con determinados equipos de medición. En EEUU se empleó el equipo ASTM y en Europa el Scrim. La hipótesis general, surgida de estas experiencias, es la siguiente: en verano, hay prolongados períodos de clima seco, que permite que las partículas finas del pavimento que son pulidas se acumulen en la superficie produciendo una pérdida de microtextura y macrotextura. Esta acción combinada con la contaminación de los vehículos (depósitos de aceite y grasa), produce un valor de resistencia al deslizamiento más bajo durante el verano.

En climas con heladas, las sales del deshielo y el uso de cadenas causan el desgaste de la superficie de los agregados que rejuvenecen, exponiendo nuevas partículas. Debido a grandes precipitaciones en primavera, las partículas finas son barridas por el agua dejando al descubierto la superficie de los agregados. Las lluvias también limpian los canales de drenaje entre los agregados, incrementando por lo tanto la macrotextura. Todo esto provoca que la resistencia al deslizamiento aumente al comienzo de la primavera. Además, se cree que el pulimento de los agregados se reduce en invierno porque el pavimento se mantiene húmedo durante períodos más largos que en verano. En períodos húmedos, la película de agua cubre el pavimento actuando como lubricante y reduciendo los efectos de pulimento de los vehículos en la superficie de los agregados.

En la zona de mayor concentración de rutas de Argentina el clima es diferente (Hemisferio Sur), la mayor parte de la red vial se encuentra en la pampa húmeda donde los veranos son lluviosos y los inviernos secos. Las heladas son poco frecuentes y no se presentan nevadas durante la temporada invernal. Las temperaturas son moderadas durante todo el año. Los equipos empleados también son otros: MuMeter, Griptester y Péndulo de Fricción. Por lo tanto, no sería correcto concluir que las hipótesis planteadas para el Hemisferio Norte se adapten a la Argentina.



Se presentan aquí distintos modelos de distintos orígenes, obtenidos de la bibliografía: desarrollados en Texas, Estados Unidos, Procedimiento de normalización de la FHWA, corrección utilizada en el LCPC para el equipo Scrim, manejo de los resultados Scrim en Inglaterra, y variación de los resultados del Péndulo de Fricción TRRL.

#### 2.3.3.1. Modelos desarrollados en Texas, Estados Unidos

Como consecuencia de una investigación llevada a cabo en diversas regiones de Estados Unidos con diferentes climas se elaboraron modelos para calcular la variación estacional del coeficiente de fricción, y fueron publicados en el trabajo "Correction of field skid measurements for seasonal variations in Texas", (Jayawickrama, 1988) [19].

En esta investigación, se procuró que las secciones analizadas estén cerca de una estación meteorológica para poder obtener datos referentes al clima con facilidad. Todos los pavimentos analizados pertenecen al tipo mezcla asfáltica en caliente. Todas las mediciones fueron realizadas con el equipo tráiler de rueda bloqueada, usando neumático con nervios y rueda 100% bloqueada, a 64 km/h y con una espesor de película de agua de 0.64 mm.

En estos estudios se puso en evidencia que ocurren variaciones importantes en la resistencia al deslizamiento entre mediciones hechas en distintos momentos. Además se notó que cuando la temperatura aumenta la resistencia al deslizamiento decrece y viceversa. Los picos en los valores parecen estar asociados a precipitaciones importantes ocurridas después de largos períodos secos. Figura 2.19.

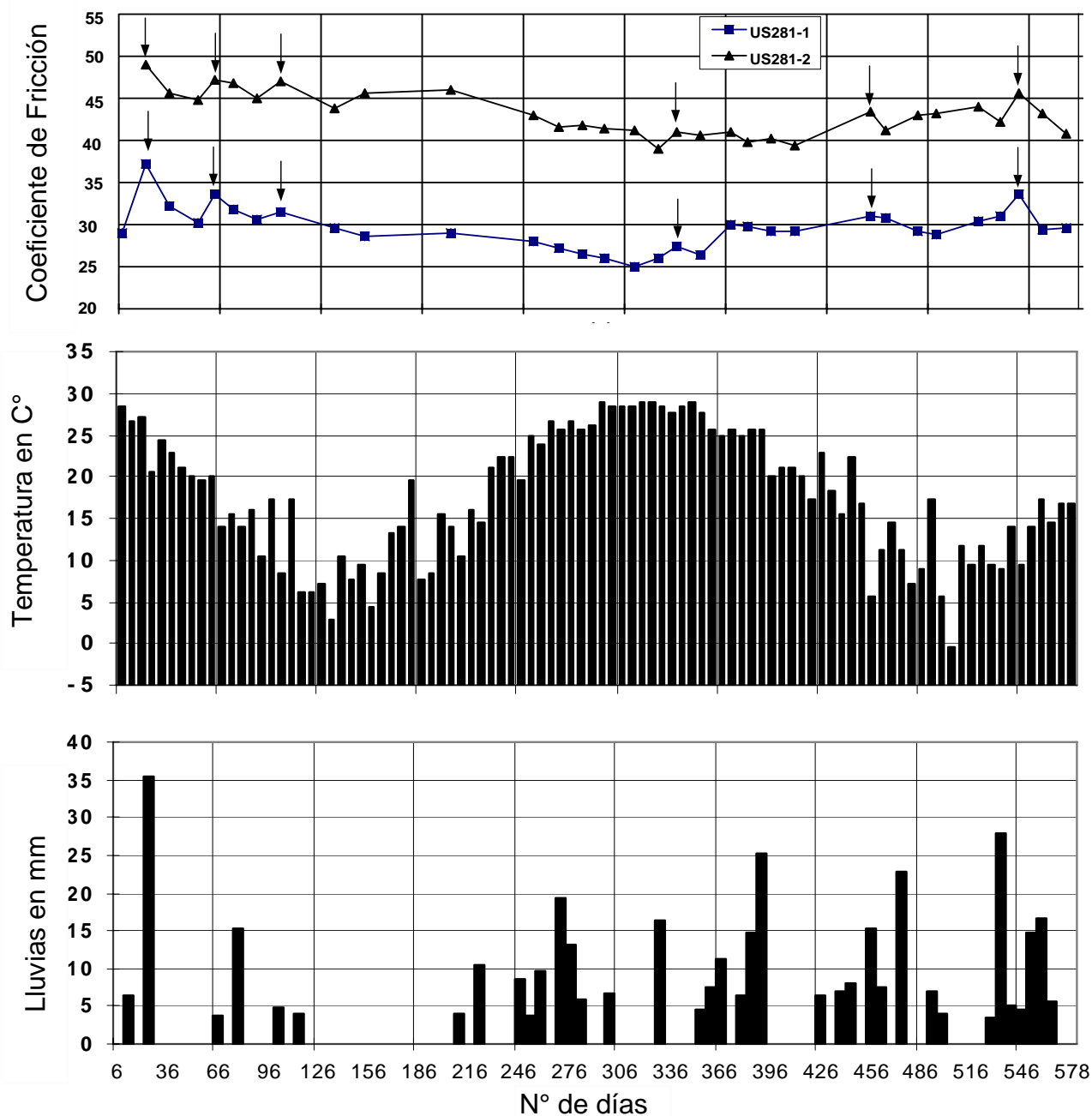


Figura 2.19. Mediciones de fricción en dos secciones (realizadas con el equipo tráiler de rueda bloqueada), temperaturas y lluvias a lo largo del año

Otra observación importante fue que todos los pavimentos analizados parecen seguir un patrón similar de variación de resistencia al deslizamiento. Además de los efectos de la lluvia y temperaturas, las variaciones de resistencia al deslizamiento se deben a otros factores tales como la posición del equipo, su calibración, la experiencia y el talento del operador. Basándose en las





observaciones se desarrollaron posibles modelos que representen esta situación.

Inicialmente se planteó un modelo que considere numerosas variables. Este es un modelo de regresión estadística, el cual tiene como objetivo representar variación del SN a lo largo del año. Su forma es la siguiente:

$$SN_{64} = A_0 + A_1(TEMP) + A_2(RF) + A_3(DD) + A_4 \log_{10}(VPPL) + A_5 \sin\{(2\pi/365) JD\} + \sum B_r I_r \dots\dots\dots$$

Donde:

$SN_{64}$  = resistencia al deslizamiento medida a 64 km/h. (40 mph)

TEMP = variable que representa las condiciones de temperatura el día de la medición y los días anteriores a ésta, explica la influencia de la temperatura en la resistencia al deslizamiento del pavimento y en el equipo de medición

RF = variable que representa las precipitaciones ocurridas con anterioridad a la fecha de medición.

DD = variable que representa los días secos anteriores al día de la medición.

VPPL = vehículos acumulados pasantes por el carril. El término  $\log(VPPL)$  representa la disminución del valor de resistencia al deslizamiento con el incremento del tránsito.

JD = día calendario correspondiente a la línea de medición

$I_r$  = indicador de variables que identifican la sección de pavimento  
( $r=1,2,\dots,5$ )

$A_i, B_r$  = coeficientes de regresión ( $i=1, 2, \dots, 5$ , and  $r=1,\dots,5$ ). El coeficiente  $A_1$  será negativo, dado que un incremento de la temperatura implica una disminución del valor de resistencia al deslizamiento.



En la forma final de este modelo se incluyeron aquellos términos de mayor peso. Las variables DD y VPPL no se incluyeron por considerarse de escasa influencia.

$$SN_{64} = a_0 + a_1(TEMP_5) + a_2(RF_5) + a_3 \sin\{(2\pi/365)JD\} + b_1I_1 + b_2I_2 + b_3I_3 + b_4I_4 + b_5I_5 + \dots$$

$TEMP_5$  = representa el promedio diario de temperatura de los 5 días anteriores a la medición ( $^{\circ}C$ ).

$RF_5$  = lluvias acumuladas durante los 5 días anteriores a la medición.

Según se indica, este modelo es poco práctico debido a que los datos que se requieren generalmente no se obtienen en exámenes de rutina.

Para salvar los inconvenientes que presenta el modelo anterior se propuso un modelo basado solamente en el calendario Juliano. La siguiente ecuación representa la forma general del modelo:

$$SN_{64} = A_0 + A_1 \sin\{(2\pi / 365) JD + A_2\}$$

Donde los términos utilizados ya fueron descriptos en el punto anterior. Como puede verse  $A_0$  representa el valor en torno al cual oscila la función,  $A_1$  es la semiamplitud y  $A_2$  está relacionado con la posición del pico de la curva. El término sinusoidal de la ecuación representa la influencia de todas las variables que presentan variaciones estacionales.

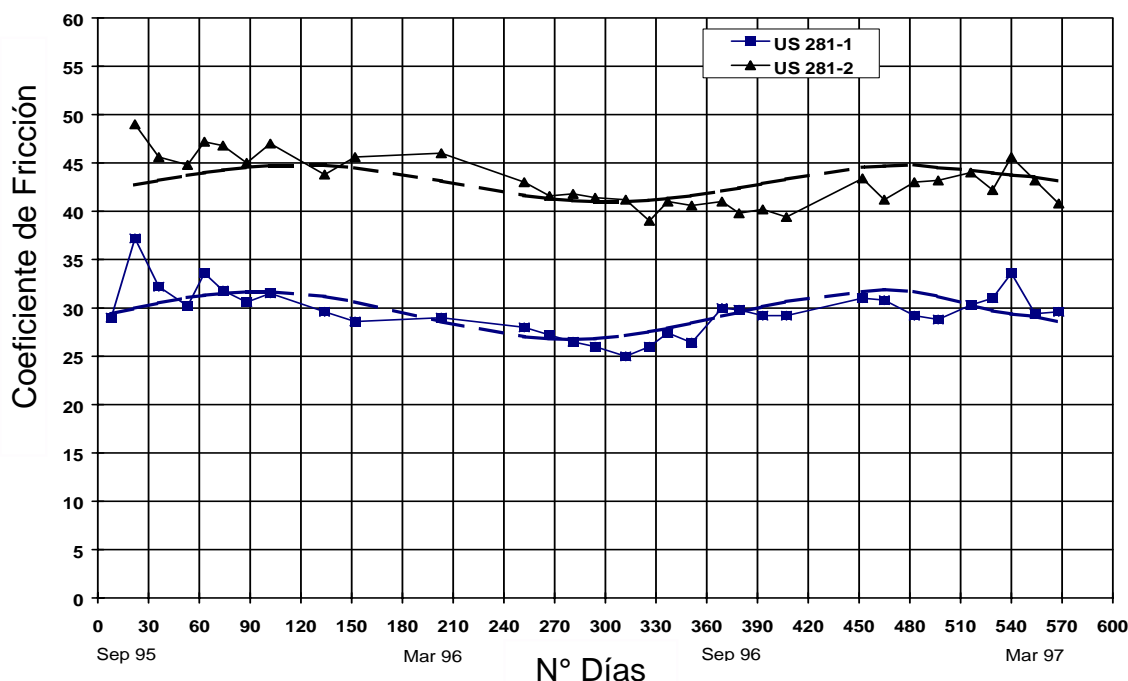


Figura 2.20. Superposición de la curva del modelo basado en el calendario Juliano y valores medidos con el equipo trailer de rueda bloqueada

Este modelo tiene una ventaja obvia sobre el modelo anterior: no se requieren datos difíciles de obtener. Sin embargo, no tiene en cuenta las variaciones a corto plazo como pueden ser grandes lluvias aisladas.

En la gráfica de la Figura 2.20. se muestra la superposición de la curva que representa el modelo basado en el calendario juliano y los valores medidos. El mismo representa adecuadamente la tendencia general de variación.

#### 2.3.3.2. Procedimiento de normalización, FHWA 1989

Este modelo de normalización fue publicado por la Federal Highway Administration (Departamento de Transporte de Estados Unidos) (FHWA, 1989) [20].

El mismo fue desarrollado a partir de un análisis estadístico de mediciones de resistencia al deslizamiento, realizadas durante una temporada en tres áreas geográficas de EEUU.



La aplicación de este modelo requiere la siguiente información:

- Medidas de resistencia al deslizamiento de cualquier día de la temporada de análisis.
- Datos del clima de una estación cercana.
- Temperaturas máximas y mínimas de un período de 30 días previos a la fecha de la medición y del mismo día de la medición.
- Precipitación total por día de, por lo menos, 7 días anteriores a la fecha de medición.
- Datos del tipo de pavimento

Este modelo fue desarrollado usando técnicas de regresión y tiene la siguiente forma:

$$SN_{40Norm} = SN_{40j} e^{b1 (DSF_0 - DSF_j)} e^{b2 (Ta_o - Ta_j)} e^{b3 (T_{30,o} - T_{30,j})} e^{b4 (t_o - t_j)}$$

Donde:

$SN_{40Norm}$  = Resistencia al deslizamiento normalizada

$SN_{40j}$  = Resistencia al deslizamiento medida el día j

Subíndices "o" se refiere al día calendario de referencia

Subíndices "j" se refiere al día de medición

DSF = Factor de período seco

$Ta$  = Promedio de las temperaturas máxima y mínimas del día en estudio ( $F^\circ$ )

$T_{30}$  = Historia de temperaturas de los treinta días previos

$b_i$  = coeficientes de regresión ( $i=1, 2, 3, 4$ ) obtenidos previamente sobre un conjunto de secciones homogéneas

#### 2.3.3.3. Factores de corrección mensual empleados en algunos Estados de EEUU

En algunos Estados se utilizan factores de corrección para poder calcular el valor mínimo de coeficiente de fricción que podría medirse con el trailer ASTM



a 64 Km/h, situación que se daría en el mes de agosto en el que la temperatura es mayor.

En la Tesis “Evaluation of pavement surface friction seasonal variations” (Rodriguez, 2009) [21] desarrollada en Virginia Polytechnic Institute and State University, se analiza la variación estacional en tramos de ensayo.

Esta tesis analiza las propiedades friccionales de nueve secciones de pavimentos durante dos años. Las mediciones se realizaron en Virginia Smart Road, esta es una pista de ensayo controlada situada entre Blacksburg y el sudeste de Virginia de 9.36 Km de longitud, la que es utilizada para investigaciones en transporte, y no se encuentra abierta al tránsito. La misma tiene dos carriles y tiene varias secciones de pavimento con distintos tipos de superficie de rodamiento, las que tienen aproximadamente 100 metros de longitud. Se realizaron mediciones mensuales con los distintos equipos y a varias velocidades. Las temperaturas del aire se obtuvieron del servicio meteorológico nacional situado en el aeropuerto más cercano (Blacksburg).

En la Tabla 2.2. se muestran los factores de corrección actualmente en uso por el Estado de Virginia para mediciones realizadas a 64 Km/h con el equipo tráiler de rueda bloqueada (NCHRP, 2000) [22] y los obtenidos en esta tesis. Ambos factores tienen una tendencia cíclica similar, pero los obtenidos en la tesis son mucho menores.

	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Tesis	1.05	1.03	1.01	1.00	1.00	1.01	1.03	1.06	1.07	1.08	1.07	1.07
Actual Virginia	1.09	1.02	1.00	1.00	1.04	1.11	1.15	1.16	1.16	1.15	1.15	1.14

Tabla 2.2. Factores de corrección mensuales

La principal conclusión de esta investigación es que la variación estacional tiene un efecto significativo en las mediciones de fricción. La tendencia general



observada es que los resultados son mayores en los meses de invierno que en verano. Esa tendencia sigue un patrón sinusoidal a lo largo del año, en forma similar a las variaciones de la temperatura del aire. Esto sugirió que la temperatura fue al menos uno de los factores que afecta a los factores de corrección por momento de medición utilizados. Se utilizaron dos equipos el DFT tester y el tráiler ASTM con ruedas bloqueadas. Los resultados obtenidos con el DFT fueron mejores. Sin embargo, el modelo sinusoidal obtenido para el tráiler fue bueno y presentó buena correlación con los factores de corrección. Finalmente se proponen nuevos coeficientes de corrección para el Estado de Virginia. Se concluyó además que los coeficientes de corrección son dependientes de la velocidad de medición.

#### 2.3.3.4. Modelos del LCPC para equipo Scrim

(Brillet y Gothié, 1983) [10] estudiaron variaciones estacionales de la adherencia de pavimentos en rutas francesas, para lo cual realizaron mediciones con el equipo SCRIM. Antes de abordar el tema de las variaciones estacionales del coeficiente, los autores ponen de relieve los factores no estacionales que influyen en las mediciones con este equipo, y en la factibilidad de reproducirlas en diferentes ensayos. Así tienen en cuenta la heterogeneidad transversal (no es lo mismo medir a la derecha del camión que a la izquierda), desgaste del neumático, variaciones de velocidad y giros del vehículo, carga sobre la rueda, ángulo de incidencia, etc., y concluyen que tales factores sólo tienen una influencia importante en recorridos cortos (menos de 100 m), y van perdiendo significación a medida que se alarga el recorrido.

En cuanto a las causas de las variaciones estacionales, Brillet y Gothié consideran dos factores principales: la temperatura y el estado de limpieza de la calzada.

Con referencia a la temperatura, realizaron un estudio en base a mediciones de coeficiente de fricción con equipo Scrim de un mismo tramo realizadas el mismo día, a medida que variaba la temperatura. Este estudio concluyó en que



existe una variación en los resultados con la temperatura, con un valor del orden de 1 punto de coeficiente de fricción cada 4 °C de variación de temperatura.

Para analizar la Variación anual del coeficiente de fricción, los autores realizaron un estudio estadístico sobre una larga serie de mediciones del coeficiente de adherencia efectuadas en rutas francesas en el período 1975 – 1982. Se encontró que los resultados presentaban una variación muy importante dependiendo de la época del año, teniendo los valores más bajos en el período septiembre – octubre. Se concluyó además que esa variación anual sigue un patrón semejante a una senoide, acompañando la curva de variación de la temperatura.

Una primera propuesta de corrección consistió en:

- plantear la definición de secciones testigo con valor conocido de coeficiente de fricción en el período septiembre – octubre.
- realizar en esas secciones nuevas mediciones, en la misma época que se miden secciones “desconocidas”.
- Calcular la diferencia existente en la sección testigo, y aplicar la misma variación al tramo a medir.

Esta propuesta trae implícita la necesidad de disponer de secciones testigo distribuidas en el país y que las mismas posean distintos tipos de carpeta de rodamiento (macrotectura) y de estados de deterioro (fisuración), ya que también concluyeron en que estos aspectos tienen influencia en los resultados de coeficiente de fricción.

Otra propuesta es aplicar una ecuación sinusoidal para corregir las mediciones realizadas en distintas épocas del año, del tipo:

$$C = M - B (1 + \cos 2 \pi (t - t_0))$$

Donde:



C valor de fricción corregido

M valor de fricción medido en cualquier época del año

t tiempo expresado en años decimales

B y  $t_0$  dependen solo del año, y son calculados a partir de correlaciones realizadas sobre numerosas mediciones repartidas en distintos años.

Brillet y Gothié concluyen que la senoide así obtenida constituye una tendencia demasiado general, que no tiene en cuenta las particularidades climáticas del año en curso; y por tal motivo prefieren que la senoide se determine cada año.

En la práctica, y según se indica en la publicación del LCPC 255 y en el Método de Ensayo nº 50 del año 2006 [23], se propone:

- Realizar las mediciones en una determinada época del año, y trabajar con esos datos como el resultado que brinda la superficie en ese momento.
- Utilizar secciones testigo distribuidas en el país, las que deben medirse periódicamente para servir como corrección de los resultados obtenidos en otras secciones.

#### 2.3.3.5. Manejo de los resultados Scrim en Inglaterra

La información presentada en este punto fue obtenida de la Norma HD 28/04 "Design Manual for Roads and Bridges. Volume 7 Paviment Design and Maintenance. Seccion 3. Pavement Maintenance Assessment. Parta 1. Skid Resistance" [12].

Luego del período inicial de desgaste, la superficie alcanza un valor de pulido de equilibrio. Si durante ese período el nivel de tránsito es constante, la resistencia al deslizamiento tendrá fluctuaciones a lo largo del año, las que oscilan alrededor de un único nivel. Si el nivel de tránsito aumenta o disminuye, ese valor de equilibrio presentará variaciones permanentes, pero las fluctuaciones estacionales seguirán estando.



Como explicación a estas variaciones se indica que en período octubre a marzo (invierno), cuando los caminos están mojados por mucho tiempo las partículas de arena presentes en la superficie hacen que la misma se torne áspera y como consecuencia la resistencia al deslizamiento aumenta. Mientras que en verano se observan las menores resistencias al deslizamiento, ya que la suciedad es fundamentalmente polvo y la superficie se pule. De acuerdo a esta explicación, las menores resistencias al deslizamiento ocurren en el período asociado a condiciones climáticas como la descripta. En la Figura 2.21 se muestra la variación presentada en la publicación HD 28/04.

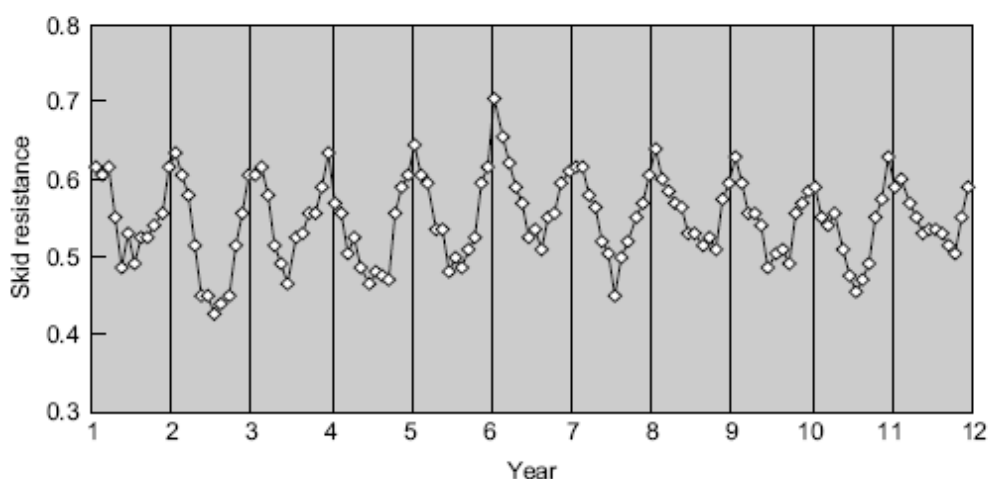


Figura 2.21. Variación del coeficiente de fricción en varios años

Para eliminar o reducir estos efectos las mediciones son realizadas bajo condiciones normalizadas, las que se describen a continuación.

- Las mediciones normalizadas son las que se realizan durante el período 1 de mayo al 3 de septiembre, en este período no son necesarias correcciones por temperatura.
- Las mediciones se realizan con temperaturas del aire superiores a 5° C.
- Toda medición que se realice fuera del período citado no cumplen con la norma y pueden estar alteradas por variaciones estacionales. La realización de estas mediciones suelen ser para estudios especiales, o



por la necesidad de resultados de un tramo específico, y deben ser realizadas con el acuerdo de quien va a analizar esos resultados.

En la misma Norma están descriptas algunas metodologías para corregir los resultados obtenidos y reducir los efectos estacionales, todos ellos se basan en que la red de caminos es medida periódicamente en la época correcta y esos datos son utilizados para corregir los nuevos resultados. O sea que, si se conoce la evolución de la red en la zona donde se encuentra el tramo una medición fuera de norma en cualquiera de ellos podrá calcularse el factor de corrección relacionando el nuevo resultado con el promedio histórico, y luego puede utilizarse ese factor para corregir los resultados en otros tramos desconocidos.

#### 2.3.3.6 Variación de los resultados del Péndulo de Fricción TRRL

En las Normas de uso del Péndulo de Fricción TRRL se indica que sus resultados deben ser corregidos a una temperatura de medición de 20 °C, de manera que los mismos puedan ser comparables entre sí. Esto indica que el parámetro temperatura tendría alguna influencia en los resultados del coeficiente de fricción.

Puede plantearse que los cambios de temperatura no tienen un efecto directo en la resistencia al deslizamiento, sino que afecta las propiedades de la goma del neumático o, en este caso, de la zapata de medición. Con temperaturas elevadas la goma se torna más flexible lo que provoca una menor pérdida de energía en la recuperación elástica. Altas temperaturas implican un decrecimiento en la medida de la resistencia al deslizamiento.

La corrección planteada indica una corrección a 20 °C, o sea:

- Temperatura = 20 °C, los resultados no se modifican
- Temperatura > 20 °C, los resultados se reducen en 1 punto cada 3 °C de diferencia, escala de mu meter de 0 a 100



- Temperatura < 20 °C, los resultados se aumentan en 1 punto cada 3 °C de diferencia, escala de mu meter de 0 a 100

## 2.4 Proyecto TYROSAFE

TYROSAFE (TYre and ROad surface optimization for Skid resistance and further effects) (Optimización de superficie de camino y el neumático respecto a la resistencia al deslizamiento y otros parámetros), es un proyecto desarrollado por la Comunidad Europea dentro del Séptimo Programa Marco (FP7/2007 – 2013) [13] [14]. Como socios en este Proyecto participaron los siguientes países e instituciones:

- Alemania - Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Países Bajos - Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart (RWS DVS)
- Francia - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
- Reino Unido - TRL Limited (TRL)
- Eslovenia - Zavod Za Gradbenistvo Slovenije (ZAG)
- Bélgica - FEHRL AISBL (FEHRL)
- Austria - Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H.

Los objetivos principales fueron coordinar la investigación en los parámetros esenciales de la interacción neumático pavimento, y conocer el impacto de los mismos, relacionados con:

- Mejorar la seguridad de la carretera: reduciendo la ocurrencia de accidentes a través de caminos más seguros con superficies con mejor resistencia al deslizamiento.
- Hacer que el transporte carretero sea más verde, menos contaminante: si las superficies de carretera están diseñadas para reducir la resistencia al rodamiento que tiene el tránsito, esto redundará en una menor generación de CO<sub>2</sub> y en una reducción del ruido generado por el tránsito.



- Introducir la armonización en la Comunidad Europea: si las carreteras responden a comportamientos similares en toda la Comunidad se reduce el error humano y se reducen los accidentes.

El trabajo se está realizando en cuatro líneas de trabajo (WP):

- WP1: Políticas de control de la resistencia al deslizamiento, la resistencia al rodamiento y la generación de ruido.
- WP2: armonización de los métodos de ensayo para medir la resistencia al deslizamiento y elegir las superficies de referencia.
- WP3: Propiedades de la superficie del camino: resistencia al deslizamiento, resistencia al rodamiento y la generación de ruido.
- WP4: efectos ambientales e impacto del cambio climático en la resistencia al deslizamiento, la resistencia al rodamiento y la generación de ruido.

La línea WP1 fue dirigida a desarrollar un procedimiento armonizado en Europa de las políticas de control relacionadas con la resistencia al deslizamiento, la resistencia al rodamiento y la generación de ruido. Políticas de control armonizadas dependerán de la provisión de procedimientos de ensayo armonizados.

La línea WP2 fue dirigida a armonizar las metodologías de medición y control de la resistencia al deslizamiento, haciendo un análisis de las técnicas existentes y de trabajos previos de armonización.

La línea WP3 hizo un estudio detallado de los factores que tienen influencia en los resultados de la resistencia al deslizamiento, la resistencia al rodamiento y la generación de ruido; analizando sus interacciones y revisando la necesidad de investigación y optimización.

Mientras que la línea WP4 fue diseñada para complementar los trabajos de las otras líneas, interactuando con ellas donde sea apropiado para investigar los



siguientes dos objetivos: identificar áreas de investigación para analizar el posible efecto ambiental en parámetros específicos, e identificar el posible impacto ambiental en los resultados de la resistencia al deslizamiento, la resistencia al rodamiento y la generación de ruido.

En la línea WP4, y relacionada con el tema de esta tesis, se elaboraron dos documentos, D12 y D16. En el D12, se resume el conocimiento existente sobre el impacto que el ambiente tiene sobre la interacción neumático pavimento, identificando los factores importantes y estableciendo los vacíos en el conocimiento sobre los cuales dirigir futuras investigaciones. En el D16, se describen los posibles impactos del cambio climático, y las implicaciones que puede tener para optimizar la resistencia al deslizamiento, la resistencia al rodamiento y el ruido generado.

El Proyecto basó su necesidad en el hecho que el clima en Europa está cambiando, y la temperatura media en algunos lugares se proyecta que se incremente en 5°C aproximadamente para el año 2100, lo que se traducirá en veranos más calientes e inviernos moderados. También se prevé que los veranos serán más secos y los inviernos más húmedos. Existen estudios que indican que esos cambios afectarán la interacción neumático pavimento, las características de los materiales y el comportamiento de los neumáticos. El impacto de esos cambios de temperatura y precipitación se observará en cambios de la variación estacional de la resistencia al deslizamiento, cambios en el pulimento de los agregados y en la cantidad de contaminantes sobre el pavimento en períodos de sequía. Tampoco está claro si habrá una reducción del período invernal y si esto redundará en una mejora de la durabilidad o en un decrecimiento de la restauración de la resistencia al deslizamiento que se produce durante el invierno.

Respecto al punto específico de la interacción neumático pavimento, el tema fue tratado en tres aspectos:



- Análisis en condiciones húmedas: es conocido que la fricción entre el neumático y el pavimento decrece significativamente cuando la superficie está mojada, ya que el agua actúa como lubricante impidiendo el contacto pleno entre ambas superficies. Mayores precipitaciones en invierno pueden extender el período en que los conductores están sometidos a riesgo de accidentes por presencia de agua sobre la calzada y por hidroplaneo. La presencia de agua sobre la superficie también reduce el pulimento a que están sometidos los agregados fundamentalmente durante períodos secos y con presencia de contaminantes en la superficie.
- Análisis en condiciones secas: durante períodos de sequía los contaminantes se acumulan sobre la superficie reduciendo la fricción. Estudios realizados (Ongel, 2009) mostraron que la resistencia al deslizamiento decrece según sea el número de días sin lluvia, hasta un valor mínimo a los 7 días. Las características del contaminante determinan la reducción, partículas redondeadas grandes generan mayor reducción que partículas angulares pequeñas. Otro aspecto importante, es que cuando llueve luego de períodos de sequía, en la primera lluvia la superficie se torna extremadamente deslizante (aguaplaning viscoso). Estudios realizados en Israel mostraron que la superficie contaminada en períodos de sequía tiene una resistencia al deslizamiento un 20% menor que la misma superficie luego de ser lavada por la lluvia. Debido a esas diferencias observadas, en algunos tramos las superficies son lavadas y en otros son colocados carteles de prevención.
- Pulimento superficial: los agregados son pulidos por la acción del tráfico con las partículas de contaminantes presentes sobre la superficie durante períodos secos, originando una reducción en la resistencia al deslizamiento. El agua actúa como lubricante, por lo tanto reduce la



acción de pulimento. El tipo de contaminante es importante, partículas menores a 0.1 mm pulen la superficie, mientras que mayores que 1 mm restauran la resistencia al deslizamiento, siendo importante también la naturaleza mineralógica del contaminante, sobre todo por su dureza.

Respecto al impacto en la variación estacional de la resistencia al deslizamiento: la combinación de temperatura y precipitación produce variación estacional de la resistencia al deslizamiento. Numerosas investigaciones mostraron este hecho, pero recientemente ha sido sugerido que este patrón aceptado de variación puede verse alterado como resultado del cambio climático:

- Influencia del clima en este ciclo: estudios realizados en algunos países, como Australia donde la estación más cálida es la más húmeda, puede haber un patrón estacional diferente, indicando que tanto la temperatura como la precipitación tienen su participación en el comportamiento estacional de la resistencia al deslizamiento. Sin embargo, ha sido identificado que el período en que el pavimento está húmedo es parámetro clave. Se indica entonces, que hay diferencias entre países y años dependiendo de las condiciones climáticas de cada momento, y por lo tanto el cambio climático previsto para el futuro puede hacer cambiar los patrones ya estudiados y adoptados en algunos países.
- Cambios en el ciclo: se muestra como ejemplo los resultados obtenidos en un estudio realizado por la WDM en Inglaterra, en el período 2002 a 2007. Los autores observaron que el patrón estacional cambió desde el año 2005, donde los resultados del período agosto – septiembre fueron menores que en mayo – junio, mientras que previamente fueron similares. Ellos concluyeron que la resistencia al deslizamiento no se está recuperando como era antes, probablemente debido a otoños más leves, y que algunos sitios fueron más susceptibles que otros. Los autores concluyeron que se debía continuar con nuevos estudios para



investigar estos cambios y posibles nuevos patrones de comportamiento. El estudio de la WDM fue el único realizado en este tema, se requiere entonces la realización de nuevos estudios de largo tiempo en otros países para analizar si está ocurriendo un cambio como consecuencia del cambio climático.

Como una conclusión del Proyecto, se encuentra la recomendación de futuras investigaciones en las siguientes áreas específicas:

- Conocer los tipos de agregados, los lugares de producción y la cantidad posible, en Europa. Fundamentalmente obtener información de donde se encuentran agregados con alta resistencia al pulimento y como son utilizados en la construcción de carreteras.
- Investigar los métodos para hacer un mejor uso de los agregados con alta resistencia al pulimento, para minimizar su consumo.
- Analizar el impacto que las partículas y los contaminantes tienen sobre la interacción neumático pavimento, por ejemplo: el pulimento por lo acumulado durante la sequía, y el hidroplaneo viscoso.
- Monitorear el cambio que ocurre en la variación de la resistencia al deslizamiento debido al cambio climático, e incrementar el conocimiento de los parámetros climáticos que causan el fenómeno.
- Como varía el ruido generado en condiciones húmedas, incluso analizar el impacto del espesor de la película de agua y la duración del incremento del ruido luego que la lluvia terminó.
- Como varía la resistencia al rodamiento en condiciones húmedas, incluso como varía con el espesor de la película de agua.
- Analizar si interacción neumático pavimento es la misma para vehículos eléctricos que para vehículos con motores a combustión.
- Identificar posibles cambios como resultado del uso de vehículos pesados más largos.
- El impacto del cambio climático en la durabilidad de la superficie y las posibles implicaciones en la interacción neumático pavimento.





- Como los cambios de uso de riegos de sal y neumáticos con clavos en invierno como consecuencia del cambio climático puede influenciar la interacción neumático pavimento.

## 2.5 Proyecto SKIDSAFE

El Proyecto FP 7 SKIDSAFE constituye un intento de examinar al nivel más fundamental el proceso que tiene lugar en la interfase entre la superficie del camino y el neumático. El Proyecto tiene como objetivo integrar el estado del arte de los modelos de neumáticos con algoritmos de rolo, algoritmos hidrodinámicos para simular el efecto del agua y modelos constitutivos avanzados. También será investigado el proceso que sucede en la totalidad de la estructura del pavimento como consecuencia de la fricción. Además, se realizarán extensos estudios experimentales para la obtención de los parámetros necesarios para la calibración de todos los modelos. Todos los estudios están relacionados con la mejora de la seguridad de conducción debido a mejoras en la resistencia al deslizamiento.

Es un proyecto en desarrollo en la Comunidad Europea dentro del Séptimo Programa Marco (FP7/2007 – 2013) [24]. Como socios en este Proyecto participaron los siguientes países e instituciones:

- Países Bajos - TU Delft (Project Coordinator); OOMS Nederland Holding
- Francia - LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
- Grecia - NTUA - National Technical University of Athens
- España - Geotecnia y Cimientos
- Reino Unido - Aggregate Industries UK

Un aspecto clave en la seguridad del camino es la provisión de una adecuada fricción entre el neumático y la superficie. Las superficies de camino con baja fricción han sido identificadas como una causa frecuente de accidentes de tránsito, porque el vehículo patina. Una consecuencia directa de este patinaje es una pérdida dramática de la capacidad de frenado y de manejo del vehículo,



lo cual conduce a accidentes y a daños en las personas. La resistencia al deslizamiento describe la contribución de la superficie del camino al desarrollo de la fricción en la interfase neumático pavimento.

La fricción se origina inicialmente de la interacción de las asperezas de la superficie con las características morfológicas del neumático del vehículo. Infortunadamente, debido al efecto pulidor del tránsito, combinado con los factores ambientales, la tortuosidad de las asperezas de la superficie decrece gradualmente, y como consecuencia, la resistencia al deslizamiento de la superficie del camino disminuye y puede alcanzar valores inseguros.

Hay muchos métodos y equipos para medir la resistencia al deslizamiento de la superficie del camino. Como resultado, se obtiene una medición del coeficiente de fricción en condiciones específicas para cada equipo en particular. En esos casos, la influencia de muchos factores que afectan la fricción entre el neumático y el pavimento no está incluida. Por lo tanto, no hay correlación directa entre los resultados obtenidos con los distintos equipos.

En los últimos años, nuevas técnicas computacionales han sido utilizadas para desarrollar algoritmos poderosos los cuales son capaces de simular el fenómeno en el área de contacto entre el neumático y el pavimento. Sin embargo, la mayoría de los estudios consideran la superficie del pavimento como un cuerpo rígido. En otros casos son asumidos modelos constitutivos muy simplistas. Por otra parte, en la mayoría de los estudios, se ha puesto énfasis en la respuesta del neumático y no del pavimento. Ahora, es conocido que la respuesta en la interfase es determinada por las características de los dos cuerpos que están en contacto.

El objetivo general del Proyecto es el desarrollo de una herramienta computacional micromecánica y multifísica para la predicción de la pérdida progresiva de la resistencia al deslizamiento como una función de la



composición de la superficie del pavimento y el deterioro de sus características con las cargas del tránsito.

Para cumplir con ese objetivo, las actividades se dividieron en seis líneas de trabajo.

Línea WP1: características micro estructurales de los agregados. Esta línea contiene las mediciones de las características friccionales de los agregados en el área de contacto con los neumáticos. Además de la medición de la microtextura, geometría y propiedades mineralógicas de los agregados, se desarrollará un nuevo equipo para obtener las características friccionales de la interfase.

Línea WP2: características micro estructurales de la mezcla de superficie bajo condiciones húmedas y secas. Los datos recogidos en WP1 se utilizarán para desarrollar modelos constitutivos para la fricción agregado goma. Se realizarán mediciones de la textura de la mezcla asfáltica de superficie para crear una malla de elementos finitos realista (FEM). Esto será utilizado en conjunto con los modelos constitutivos de fricción y los algoritmos de contacto para la simulación FEM de la interacción superficie goma bajo condiciones húmedas y secas. Los resultados serán verificados por medio de ensayos en la interfase entre el concreto asfáltico y la goma. Simulaciones FEM paramétricas podrán conducir a la identificación de las relaciones entre el diseño de la mezcla y las características de fricción.

Línea WP3: modelización por elementos finitos de la interacción neumático pavimento. Esta línea se focaliza en el desarrollo e implementación del sistema de elementos finitos CAPA-3D de todas las herramientas de elementos finitos necesarias y de las metodologías para simulación de la interacción neumático pavimento en movimiento. En las simulaciones, serán consideradas las características de la superficie y la estructura del pavimento como así también las características de los neumáticos.



Línea WP4: resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento. El principal objetivo es la determinación de la interrelación entre el diseño de la mezcla asfáltica y la resistencia al deslizamiento desarrollada por la superficie bajo varias condiciones de humedad (las representación de las condiciones de inundación se representan en la línea WP5). Extensas mediciones de campo serán complementadas con simulaciones de elementos finitos dinámico no lineal de la interacción entre el neumático rodando y la estructura del pavimento. El análisis de elementos finitos permitirá la identificación y la cuantificación de la contribución de los varios procesos y mecanismos presentes en la medición de Resistencia al deslizamiento realizada en cada momento.

Línea WP5: Hidroplaneo. Esta línea se focaliza en el caso extremo de deslizamiento debido al hidroplaneo bajo condiciones húmedas. Un vehículo instrumentado equipado para medir parámetros relacionados con el hidroplaneo (como espesor de película de agua y esfuerzos y momentos en las ruedas) será utilizado para recoger los datos necesarios para calibrar el modelo FEM que combine el algoritmo de contacto de rodamiento con el algoritmo hidrodinámico. Las corridas paramétricas FEM permitirán el desarrollo de las relaciones entre el diseño de mezclas y la sensibilidad al hidroplaneo.

Línea WP6: herramientas para la gestión de la Resistencia al deslizamiento del pavimento. Sobre la base del conocimiento obtenido de las otras líneas, se desarrollarán herramientas para la gestión del diseño de mezclas, límites de velocidad variables y estrategias para el óptimo diseño de estrategias de mantenimiento.

## **2.6 Estudios previos realizados en la UNR**

En el Laboratorio Vial del IMAE el estudio y realización de investigaciones en el tema se inició hace varios años; por no disponer de equipos propios para la medición continua las tareas se desarrollaron en convenios realizados con la



Dirección Nacional de Vialidad “DNV”, el Órgano de Control de Concesiones, Empresas Concesionarias y Empresas privadas del medio. Los convenios son:

1. 1994 – 2000. Convenio entre la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario y la Cámara de Concesionarios Viales para el "Estudio de las condiciones técnicas exigibles a las calzadas pavimentadas en los pliegos que rigen la concesión de obras viales" en los temas Rugosidad y Adherencia neumático - calzada. Responsable: Marta Pagola.
2. Noviembre 1999 – actual. Convenio entre la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario y la DNV para el "Análisis de agregados pétreos provenientes de canteras de Argentina para ser utilizados en carpetas de rodamiento". Responsable: Marta Pagola.
3. Agosto 2000 – actual. Memorando de Entendimiento entre la Universidad Nacional de Rosario y el Ministerio de Fomento de España a través del Laboratorio de Demarcación de Carreteras de Andalucía Oriental, para la realización de “Ensayos cruzados de pulimento acelerado de agregados pétreos”. Responsable: Marta Pagola.
4. Agosto 2005 – actual. Convenio entre la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario y la DNV, para la “Control de operación y calibración a IFI de los tres equipos Mu Meter y el equipo SCRIM para medición de coeficiente de fricción y textura de las superficies pavimentadas”. Responsable: Marta Pagola.
5. Octubre 2005 – mayo 2006. Convenio entre la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario y la DNV Distrito 14º San Luis, para la “Actualización del equipo Mu Meter



para la medición del coeficiente de fricción de la superficie de las calzadas pavimentadas”. Responsable: Marta Pagola.

6. Octubre 2006 – actual. Convenio entre la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario y la DNV, para la “Gestión de la Evaluación” (actualización de los equipos y programas de procesamiento que utiliza la DNV para la Evaluación de calzadas). Responsable: Marta Pagola.

En los distintos estudios realizados se obtuvieron importantes avances del tema en Argentina, los cuales fueron objeto de numerosas publicaciones, en forma breve de solo títulos algunos de ellos son:

1. Puesta en funcionamiento de los equipos Mu Meter de la DNV, según norma de ensayo ASTM E 670.
2. Análisis de la variación en los resultados de coeficiente de fricción medidos con equipos Mu Meter respecto a: temperatura, desgaste del neumático, velocidad de medición, espesor de película de agua.
3. Análisis de la repetibilidad en los resultados de los equipos de medición del coeficiente de fricción en uso en Argentina: Mu Meter, Griptester y ScrimTex.
4. Relevamiento de las características de adherencia neumático calzada en la superficie de distintos tramos de rutas pavimentadas en uso en Argentina.
5. Calibración a IFI de los equipos mu meter y griptester de medición del coeficiente de fricción, utilizando como parámetro de macrotextura las mediciones realizadas con Círculo de Arena.



6. Calibración a IFI del equipo Scrim tex de medición del coeficiente de fricción, utilizando como parámetro de macrotextura las mediciones realizadas con sensor laser del propio equipo.
7. Realización del software de procesamiento de resultados para los equipos de la DNV: mu meter, Scrim Tex, MRM, BPR, FWD y Lacroix.
8. Control periódico de las condiciones operativas de los equipos de la DNV.
9. Elaboración en conjunto con la DNV de las metodologías para medir rugosidad y adherencia neumático calzada, las cuales forman parte de la Resolución de la DNV.
10. Implementación en Argentina de los primeros equipos para ensayo de Pulimento Acelerado y Micro Deval de agregados pétreos.
11. Realización de ensayos cruzados de Pulimento Acelerado con un Laboratorio Español.
12. Análisis de los agregados pétreos procedentes de canteras comerciales en Argentina distribuidas en las zonas de mayor producción y venta de agregados.

En los puntos siguientes se describen, en forma resumida, aquellos resultados de investigaciones relacionadas con el tema específico de Modelos de Comportamiento de Adherencia Neumático Calzada.

#### 2.6.1. Determinación del IFI en Argentina

En Argentina y a los fines de determinación del IFI, se dispone de equipos que no participaron directamente en el experimento, pero como dos de ellos son



considerados como equipos de referencia se procedió a determinar las constantes de los otros equipos, siguiendo las indicaciones de la AIPCR.

Los equipos considerados como referencia son: Péndulo de fricción marca STANLEY equipado con zapatas de caucho tipo ASTM, y Equipo para la realización del Círculo de Arena. Los equipos calibrados son: Mu Meter, Griptester y Scrim Tex.

Considerando entonces la medición de macrotextura realizada con Círculo de Arena y la medición de fricción realizada con el Péndulo de Fricción, y utilizando las constantes “a, b, A y B” de los equipos A8 (círculo de arena) y A14 (péndulo de fricción con zapatas ASTM) participantes en la experiencia IFI, se obtuvieron las constantes para poder expresar el IFI con los otros equipos.

Las constantes utilizadas en los equipos de referencia y las obtenidas son indicadas en la Tabla 2.3.

Esta tarea se realizó en trabajos conjuntos con la Dirección Nacional de Vialidad y Empresas Concesionarias de Rutas, Pagola et al, 2006. [26]. Se eligieron tramos ubicados en sectores de rutas en servicio, considerando distintos tipos de carpeta de rodamiento de manera de tener representación de la mayoría de las superficies existentes. Los tramos elegidos se encuentran en sectores con bajas deformaciones tanto longitudinal (rugosidad) como transversal (ahuellamiento), con pendiente longitudinal reducida y en sectores de alineamiento recto. En los tramos ubicados en zonas con carriles múltiples la medición se realizó en el carril externo.

Se eligieron 27 sectores de ruta ubicados en los alrededores de la Ciudad de Rosario y en la Red de Accesos a Buenos Aires. En el caso del equipo Scrim Tex que posee medición diferenciada en ambas huellas, cada una se consideró como un tramo distinto para la calibración, resultando la misma realizada con 54 tramos.





Las carpetas de rodamiento estuvieron representadas de la siguiente manera, considerando un total de 27 sectores: 7 mezcla asfáltica convencional, 6 mezcla asfáltica envejecida, 5 micro concretos asfálticos, 1 mezcla asfáltica drenante, 4 asfáltica tipo SMA y 4 de hormigón.

En todos los tramos seleccionados se realizaron mediciones de macrotextura con Círculo de Arena y coeficiente de fricción con Péndulo de Fricción. Se midieron diez puntos en cada tramo, ubicados sobre las huellas de circulación de los vehículos.

Con los equipos se realizaron dos mediciones en cada tramo, todas en las condiciones normalizadas de operación: velocidad 60 km/h y espesor de agua 1 mm. La línea de medición elegida fue la huella interna del carril externo, en todos los tramos. Para ello los equipos debieron posicionarse de manera que la rueda medidora quedara ubicada sobre la huella a medir. La Tabla 2.3 muestra las constantes obtenidas para cada equipo, y la Figura 2.22 al equipo de personas realizando las mediciones puntuales.

CONSTANTES PARA OBTENCIÓN DEL IFI (F60, Sp)					
Equipo	Textura	a	b	A	B
Péndulo de Fricción	Círculo Arena	-11.5981	113.63	0.07784	0.00709
Scrim Tex	Laser MPD Lin	-16.4452	60.63	0.0738	0.00664
Mu Meter 14º Distrito San Luis	Círculo Arena	-11.5981	113.63	0.0867	0.00708
Mu Meter 1er Distrito Buenos Aires	Círculo Arena	-11.5981	113.63	0.0818	0.00808
Griptester	Círculo Arena	-11.5981	113.63	0.0751	0.00663

Tabla 2.3. Constantes para obtención del IFI

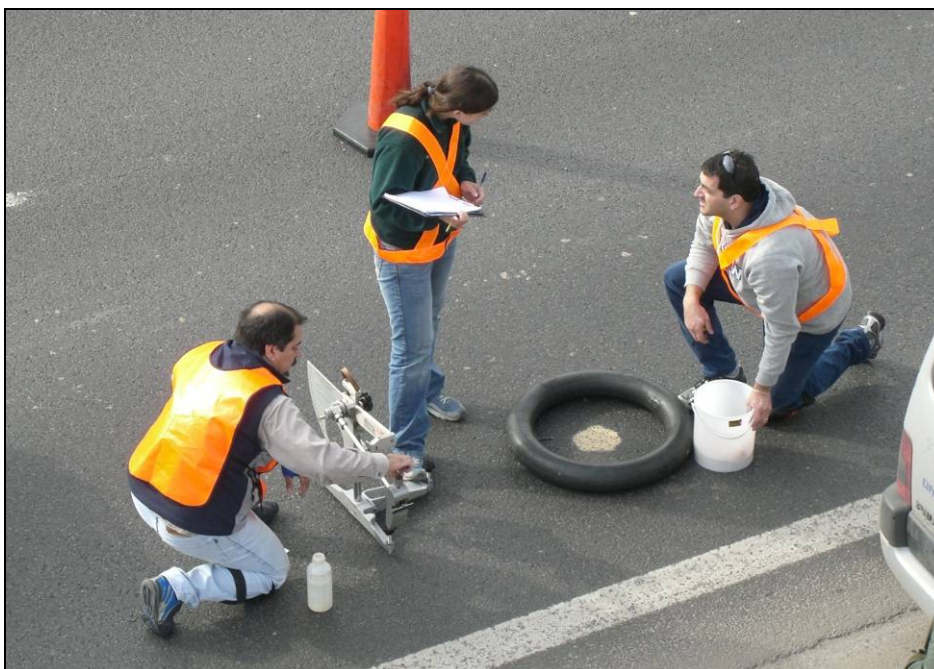


Figura 2.22. Personal realizando mediciones de campaña

#### 2.6.2. Variación de los resultados de Mu Meter con la temperatura

Durante la medición los tres elementos participantes tienen un comportamiento influenciado por la temperatura. En esta situación, la temperatura que importaría es una temperatura ponderada de los elementos intervinientes: agua, pavimento y neumático, en el momento efectuarse la medición. Esta temperatura ponderada es un parámetro difícil de valorar o medir, y si pueden medirse las tres temperaturas participantes, cosa que se encuentra indicada en la metodología de trabajo de algunos equipos de medición.

Durante las mediciones de la campaña realizadas para valorar el desgaste del neumático se valoraron las temperaturas del agua, aire y pavimento a los fines su influencia en las mediciones de Mu Meter. Este equipo no posee sensor de temperatura incorporada, entonces al finalizar la medición del tramo se midieron las distintas temperaturas posibles: aire, pavimento seco y agua remanente en superficie. Esta temperatura del agua remanente en superficie es



una temperatura combinada entre la de la superficie y la del agua, siendo la misma que la indicada en la metodología de trabajo del Péndulo tipo TRRL.

Esta tarea fue realizada en cuatro tramos de aproximadamente 4 Km de longitud, con distinta característica de macrotextura y con temperatura del agua remanente en superficie variable entre 15 y 24 °C. Se realizaron análisis de tendencia de variación de los resultados con las distintas temperaturas medidas. De todos los comportamientos analizados, la tendencia de variación con la temperatura del agua remanente en superficie fue la que brindó mejores resultados, y se muestra en la Figura 2.23. Cada conjunto de resultados pertenece a un tramo distinto.

El entorno de temperaturas del agua remanente en superficie presente en este análisis es estrecho, pero está condicionado por el elevado caudal de agua utilizado en las mediciones con Mu Meter. Es entonces la temperatura del agua de riego la que suaviza los resultados, y hace que las temperaturas más elevadas se reduzcan y las más bajas se eleven. Durante las mediciones, la variación de la temperatura del aire fue entre 8 y 24 °C, y la del pavimento entre 12 y 34 °C.

Se observa que la tendencia de variación es acorde a lo indicado en la bibliografía, a mayor temperatura el coeficiente de fricción es menor. El hecho de que las tendencias presenten pendientes similares, pone de manifiesto la aptitud de la temperatura adoptada como indicador para efectuar la corrección de resultados.

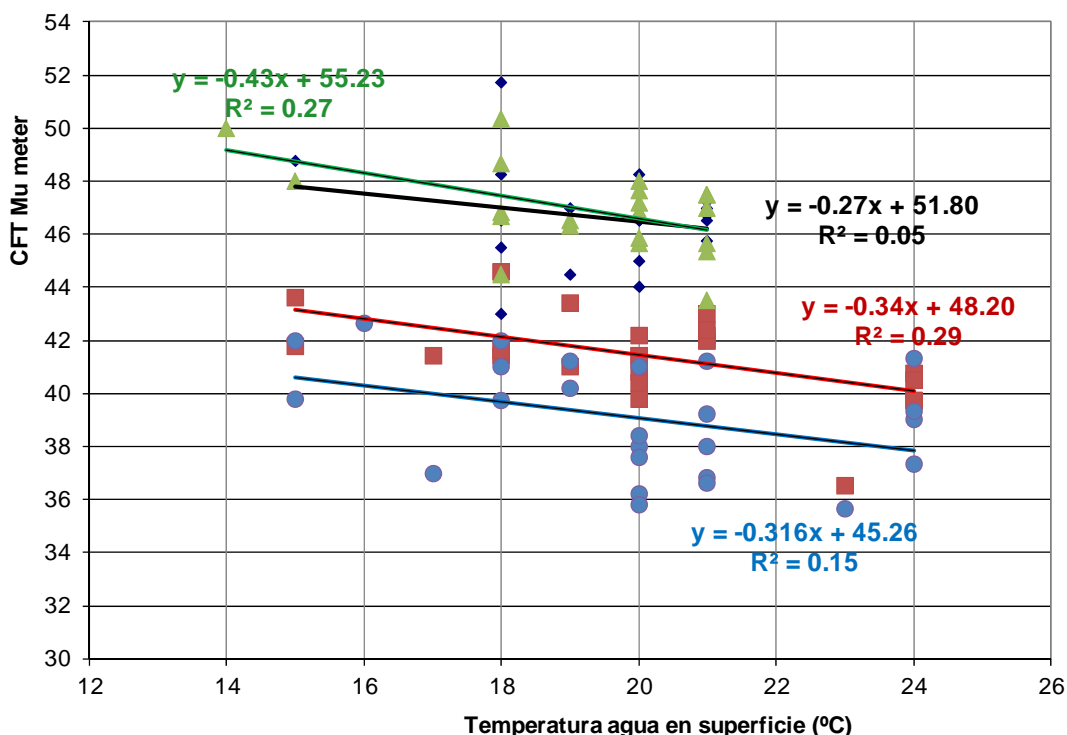


Figura 2.23. Variación CFT Mu meter con la temperatura del agua en superficie

Se realizó un análisis estadístico de todos los datos disponibles posibilitado por el gran número de mediciones efectuadas, y se planteó una corrección por temperatura con una regresión lineal, adoptando una temperatura de referencia de 20 °C (que es la adoptada como referencia en las mediciones realizadas con el Péndulo de Fricción).

La ecuación de corrección planteada tiene la siguiente forma:

$$\text{Mu corregido} = \text{Mu} + \mathbf{a} * (\text{Temp. Agua} - 20 \text{ °C})$$

Donde “a” es una constante.

En el análisis realizado se buscó el valor de la constante “a” que hiciera mínimas las diferencias obtenidas en las distintas mediciones de cada kilómetro. Esto se logró mediante la aplicación de la técnica de mínimos cuadrados.

El valor obtenido para la constante “a” es igual a 0.33, siendo aproximadamente de 1 unidad Mu Meter cada 3 grados (de diferencia de temperatura respecto a 20 °C). Siendo necesario incrementar las mediciones realizadas a más de 20 °C, y disminuir las realizadas a menos de 20 °C.

El factor de corrección necesario de aplicar para expresar las mediciones a la temperatura de referencia de 20° C se encuentra graficado de la Figura 2.24 en conjunto con la curva de corrección por temperatura que se utiliza para el Péndulo de Fricción, en ella se observa:

- En línea negra la corrección por temperatura especificada para el Péndulo de Fricción en la Norma de ensayo (todas las normas extranjeras utilizan la misma corrección).
- En línea roja, y con un menor entorno de trabajo, la corrección a la que se arribó del análisis para el equipo Mu Meter.

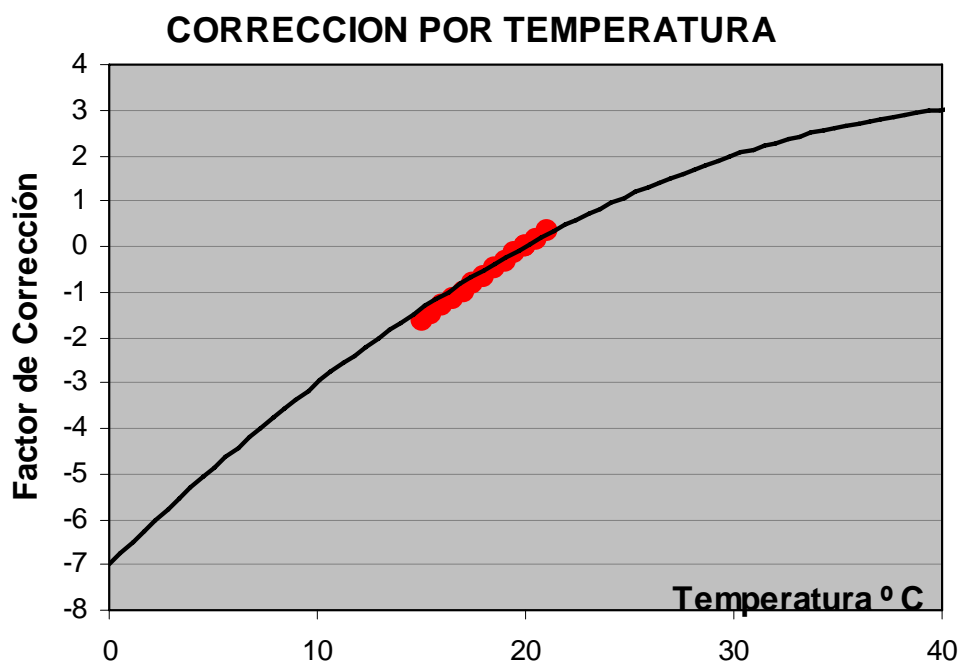


Figura 2.24. Factor de corrección por temperatura



Como puede observarse, para el entorno de temperaturas analizadas, el factor de corrección por temperatura del equipo Mu Meter es igual al utilizado para corregir el Péndulo de Fricción.

En Argentina no se aplica ningún factor de corrección. Las especificaciones técnicas fijan un valor a ser verificado durante todo el período de servicio de la calzada,  $\mu \geq 40$ , y no se hace referencia al momento de medición, con lo cual ese valor debe ser verificado en cualquier momento del año.

Con el factor de corrección por temperatura encontrado para este equipo podría llegar a plantearse una corrección, si lo que se está buscando es valorar el resultado que se obtendría a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , valor este de temperatura que podría ser considerado ya que es una temperatura representativa para una amplia zona del territorio nacional. [33].

### 2.6.3. Estimación del $\mu$ de Referencia

En Argentina existen todavía algunos Pliegos de Especificaciones Técnicas que plantean el control del “coeficiente de fricción” en unidades de equipo Mu Meter. [26] [27] [28].

Por otro lado, como equipos disponibles para realizar mediciones, la Dirección Nacional de Vialidad dispone dos equipos Mu Meter y un equipo Scrim Tex.

Si se pretende comparar directamente los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con los distintos equipos surge un inconveniente, ya que los resultados no son iguales. Los dos equipos Mu Meter, a pesar de ser “iguales”, no brindan los mismos resultados, Figura 2.25. Eso implica un problema al momento de realizar mediciones en términos de equipo Mu Meter y de verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas. El equipo Scrim Tex, por su parte, mide un coeficiente de fricción distinto ya que las características del equipo y de operación son diferentes a las de los equipos Mu Meter.

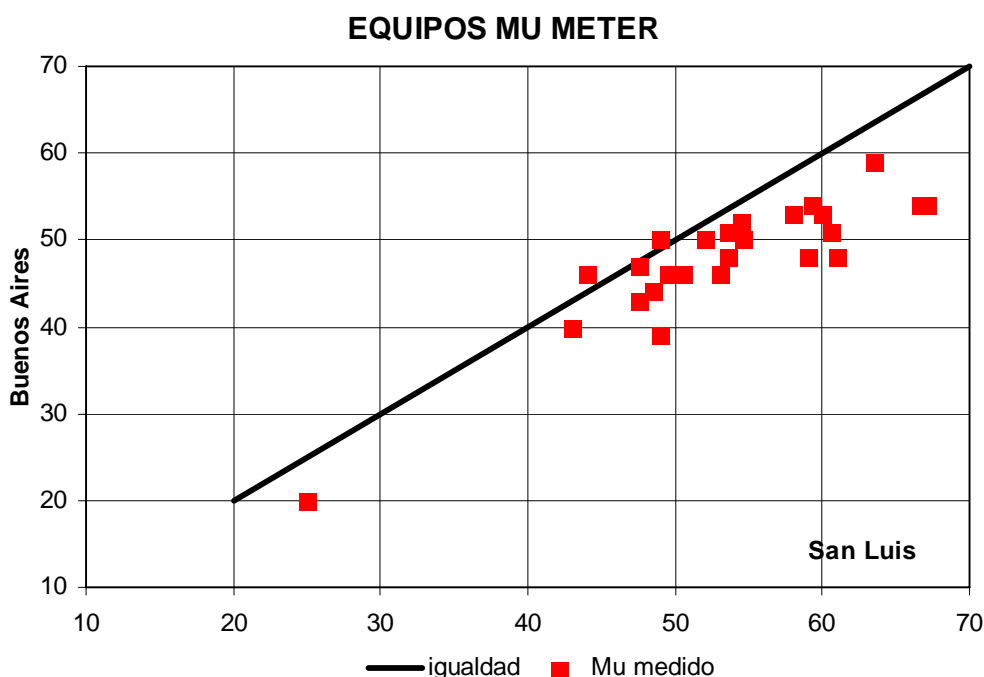


Figura 2.25. Relación entre equipos Mu Meter en unidades Mu medido

Por ese motivo se planteó la necesidad de definir una unidad de equipo “Mu de Referencia”, que no representa a ninguno de los equipos en particular. Esta unidad Mu Ref se obtuvo utilizando el IFI como punto de paso (Pagola et al, 2008), obtenido con Péndulo de Fricción y Círculo de arena, y permite que los resultados obtenidos con todos los equipos sean comparables. No se utilizó directamente el IFI para respetar lo indicado en los Pliegos de Especificaciones Técnicas que rigen los contratos de obra y concesión de rutas. Cada uno de los equipos disponibles posee entonces factores que permiten expresar sus resultados en Mu Ref. En la Figura 2.26 se observa la relación de los mismos resultados mostrados en la Figura 2.25, pero expresados en Mu Ref para ambos equipos Mu Meter.

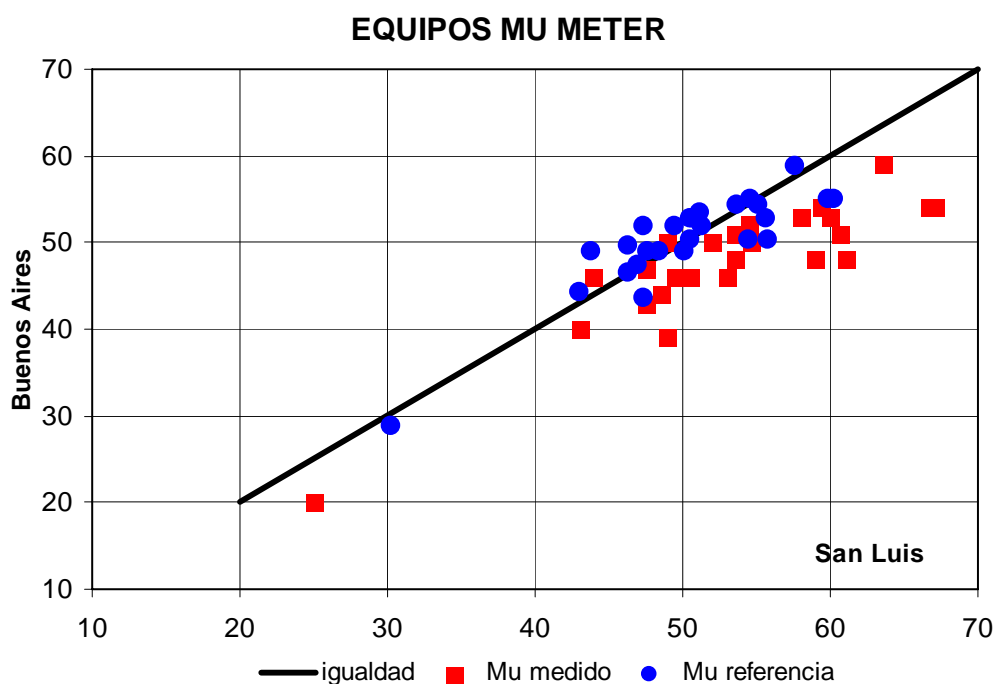


Figura 2.26. Relación entre equipos Mu Meter en Mu Ref

En las mediciones que se realizan a partir de la fecha de esa definición, diciembre 2006, los informes de coeficiente de fricción elaborados por los equipos Mu Meter están en unidades Mu Ref, mientras que en los informes del equipo Scrim Tex se encuentra una columna adicional con el valor estimado de Mu meter en unidades Mu Ref.

Respecto a la medición de adherencia neumático calzada, se ha elaborado un nuevo instructivo de medición, en forma conjunta con la Dirección Nacional de Vialidad. El anterior instructivo era del año 2005 y solo contemplaba al equipo Mu Meter. El instructivo vigente responde a la Resolución nº 655/08 de fecha 02/05/2008 y tiene incorporada la metodología para medir con cualquier equipo y expresar los resultados en términos IFI.





## 2.7 Análisis del material bibliográfico

Se han descripto modelos y metodologías de distinto tipo halladas en la bibliografía y todas relacionadas con la variación que la adherencia neumático calzada presenta con la temperatura y a lo largo del año. En este aspecto, los estudios se basaron fundamentalmente en la variación de la resistencia al deslizamiento, ya que la textura presenta variación en el tiempo pero no está relacionada con la época del año.

La metodología de medición de la resistencia al deslizamiento utilizada en EEUU, Francia e Inglaterra indica que para minimizar la influencia de las variaciones estacionales en los resultados, la recolección de datos debe realizarse siempre en la misma época del año, habiendo tomado como referencia aquella en que el valor de coeficiente de fricción es mínimo, y asociado a la época de mayores temperaturas y pocas precipitaciones.

Si es necesario hacer mediciones en otra época del año, se plantean modelos formados por ecuaciones o coeficientes de corrección para predecir el valor de fricción que se produciría en una época definida como “normalizada” o “de referencia” a partir de mediciones realizadas en cualquier época del año. Todos los modelos comentados fueron elaborados luego de extensos análisis de resultados obtenidos en tramos seleccionados en caminos reales y sometidos a las variaciones climáticas del lugar de emplazamiento.

En la actualidad, a nivel de la Comunidad Económica Europea, se están desarrollando nuevos proyectos para, entre otras cosas, revisar los modelos de variación con las condiciones climáticas, debido al cambio climático que se está sucediendo en el Planeta.

En Argentina, no se plantea ninguna corrección estacional del coeficiente de fricción, y los resultados que se informan representan la respuesta de la superficie en un determinado momento del año. Esto presenta un gran



inconveniente al momento de utilizar los resultados obtenidos con fines de penalización, en la red de rutas concesionadas. O sea verificar el cumplimiento de las Especificaciones Técnicas que rigen la Concesión.

Por otro lado, se presentaron modelos de predicción del coeficiente de fricción y de la macrotextura, particulares para determinados equipos. No se han encontrado modelos para predecir la adherencia neumático calzada expresada en F60 (IFI), parámetro éste que permite analizar resultados en forma independiente de los equipos de medición utilizados.



### **CAPÍTULO 3. RESULTADOS DISPONIBLES PARA ANÁLISIS, MEDICIONES EN TRAMOS DE RUTA**

Como fue indicado previamente, el presente estudio tuvo como objetivo principal cuantificar la variación que presenta la adherencia neumático calzada con la temperatura y con el tiempo en servicio bajo tránsito.

Particularmente se buscó definir modelos de comportamiento de la adherencia neumático calzada que permitan predecir dicha la evolución en el tiempo, valorada a través de los parámetros individuales y del IFI, aplicados a carpetas de rodamiento en uso en Argentina. Donde los resultados estuvieran particularizados a los materiales y a las condiciones climáticas de Argentina.

Para arribar a estos objetivos, se analizaron los resultados de mediciones de campaña realizadas en tramos de ruta. O sea que se dispone de resultados de los parámetros relacionados con la adherencia neumático calzada en distintos tramos de calzadas pavimentadas, con las siguientes particularidades:

- Todas las secciones corresponden a superficies de mezcla asfáltica, con distintas características.
- Los tramos están sometidos a tránsito de distinto tipo, desde secciones de autopista con un tránsito muy elevado, hasta secciones sin nada de tránsito.
- Se utilizaron distintos tipos de equipos.

En cada uno de los tramos utilizados se indican sus características y el tipo de equipo de medición. En los puntos siguientes se presenta cada tramo en forma individual, indicando los datos disponibles detalladamente y los resultados del análisis realizado.



### **3.1 Tramos en Virginia Smart Road**

Virginia Smart Road consiste en la implementación de tramos de camino ubicados en una ruta “real” para la realización de investigaciones, está ubicada al sudoeste del Estado de Virginia, entre la localidad de Blacksburg y la ruta I-81, Estados Unidos. Esta sección de ruta tiene 3.2 Km de longitud y es utilizada para investigaciones relacionadas con el transporte, entre las que se encuentran la valoración de las propiedades de superficies pavimentadas. Sobre la misma se encuentran definidas secciones de ensayo de aproximadamente 100 metros de longitud, 11 con superficie asfáltica y 2 con superficie de hormigón.

En estas secciones se realizaron mediciones de coeficiente de fricción con dos tipos de equipo: puntuales con DFTester y continuas con Trailer de rueda bloqueada. Y también se realizaron mediciones de macrotextura con Circular Texture meter.

Se dispone de resultados mensuales de coeficiente de fricción y macrotextura medidos durante más de 1 año. Se dispone además de datos de temperatura obtenidos en estación meteorológica.

Estos resultados han permitido el análisis de la influencia que la temperatura tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con DFTester y trailer de rueda bloqueada, y de la adherencia neumático calzada expresada en IFI. Si bien estos tramos no representan las condiciones existentes en rutas de Argentina, los resultados del análisis obtenido pueden ser comparados con los obtenidos en tramos de rutas con agregados y equipos en uso en Argentina.

#### **3.1.1. Tipo de superficie de rodamiento**

Las secciones con superficie asfáltica son de los siguientes tipos: seis mezclas que responden a diseños Superpave con distinta estructura granulométrica y



tipo de cemento asfáltico, una con mezcla drenante (OGFC) y dos con SMA.

En la Tabla 3.1 se indican las características básicas de las secciones y la fecha de construcción de las secciones con superficie asfáltica. La denominación SM (surface mix) incluye el tamaño máximo del agregado (9.5) y la letra (A, D o E) identifica al tipo de cemento asfáltico según su grado PG (PG 64-22, PG 70-22 y PG 76-22). La mezcla identificada como SM 9.5D es la más utilizada en las autopistas interestatales en Virginia. Las secciones Loop y L tienen superficie con SMA, mientras que la sección K tiene una mezcla drenante. Figura 3.1. (Roa, 2008) [29]

Sección	Tipo de Mezcla	Tamaño máximo del agregado	Tipo cemento asfáltico	Fecha de construcción
Loop	SMA	12.5 mm	PG 76-22	11/09/99
A	SM 12.5D	12.5 mm	PG 70-22	11/11/99
B	SM 9.5D	9.5 mm	PG 70-22	11/11/99
C	SM 9.5E	9.5 mm	PG 76-22	11/12/99
D	SM 9.5A	9.5 mm	PG 64-22	11/10/99
I	SM 9.5A	9.5 mm	PG 64-22	11/08/99
J	SM 9.5D	9.5 mm	PG 70-22	11/08/99
K	OGFC	9.5 mm	PG 76-22	26/05/06
L	SMA 12.5	12.5 mm	PG 76-22	11/09/99

Tabla 3.1. Características de las secciones de ensayo



Figura 3.1. Virginia Smart Road

### 3.1.2. Tránsito

Este tramo de camino no se encuentra abierto al tránsito, por lo cual es ideal para la realización de investigaciones especiales que necesiten que las superficies y estructuras no se deterioren con el paso del tránsito.

### 3.1.3. Clima

Se dispone de datos de temperatura del aire obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional de la estación próxima al Virginia Smart Road. En la Tabla 3.2 se observan las temperaturas medidas en las secciones.

Temperatura °C						
Sección	28/06/07	27/08/07	17/09/07	152/10/07	28/11/07	10/12/07
Loop	11.0	40.5	41.3	25.9	17.5	15.9
A	9.5	40.2	40.9	25.4	17.0	16.0
B	9.5	40.6	40.9	25.4	17.7	16.1
C	10.0	42.3	43.0	25.6	18.6	16.4
D	9.1	43.2	42.9	25.6	17.0	16.5
I	7.4	38.2	39.2	25.0	15.4	16.7
J	9.6	38.4	39.9	25.0	16.0	16.7
K	12.7	41.3	44.9	28.1	19.8	17.7
L	10.4	38.5	41.4	25.7	16.9	17.0

Tabla 3.2. Temperaturas medidas en las secciones

En la Figura 3.2 se encuentran superpuestas las temperaturas medidas (promedio para todas las secciones), con los valores medios de la zona para los meses del año obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional.

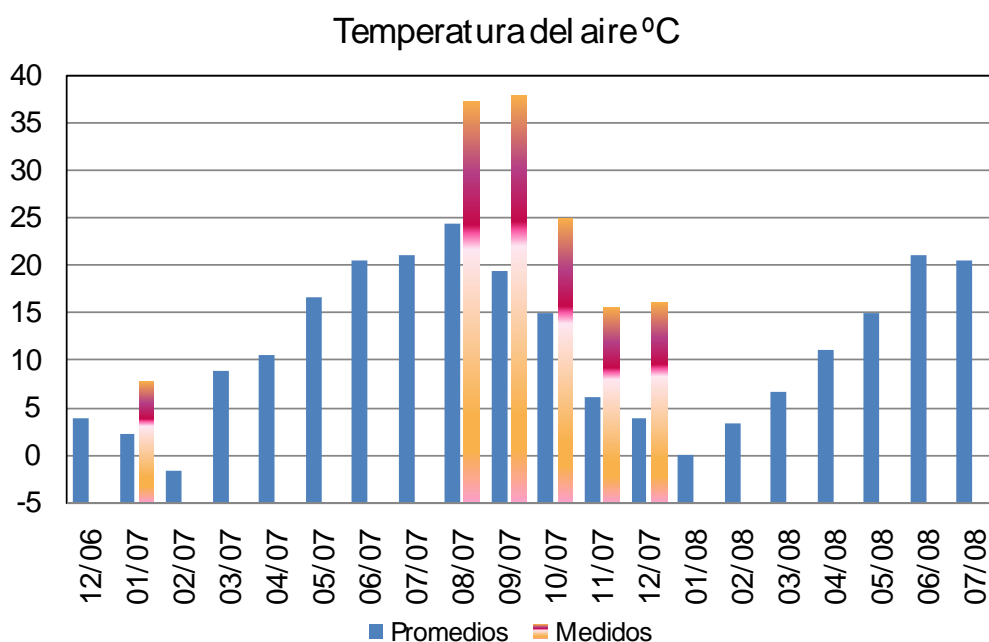


Figura 3.2. Temperaturas promedio y medidas



#### 3.1.4. Mediciones realizadas

Se dispone de las siguientes mediciones, realizadas durante casi dos años:

- Trailer de rueda bloqueada: se realizaron tres mediciones repetidas cada mes, en cada dirección y en cada velocidad: 32, 64 y 80 Km/h.
- DFTester: tres mediciones repetidas mensuales de acuerdo a la norma ASTM E-1969, a cuatro velocidades: 20, 40, 60 y 80 Km/h. Las mediciones se realizaron en tres localizaciones preseleccionadas en cada sección y carril, con puntos marcados sobre el camino para permitir ensayar el mismo lugar cada mes. Las mediciones se realizaron el mismo día que con el Trailer de rueda bloqueada.
- CTMeter: mediciones de macrotextura mensuales en los mismos sectores que con DFTester.

#### 3.1.5. Mediciones de coeficiente de fricción con Trailer de rueda bloqueada

Se realizaron mediciones repetidas durante casi dos años, las secciones fueron medidas en dos direcciones identificadas como E y W.

La medición normalizada de este equipo es 64 Km/h, pero se realizaron también mediciones a 32 y 80 Km/h como parte de otros estudios, para analizar por ejemplo la variación que presentan los resultados con la velocidad de medición.

En las Figuras 3.3 y 3.4 se encuentran graficados los resultados obtenidos a 64 Km/h, mientras que en el Anexo se encuentran las tablas con resultados numéricos. (Rodriguez, 2009) [21].



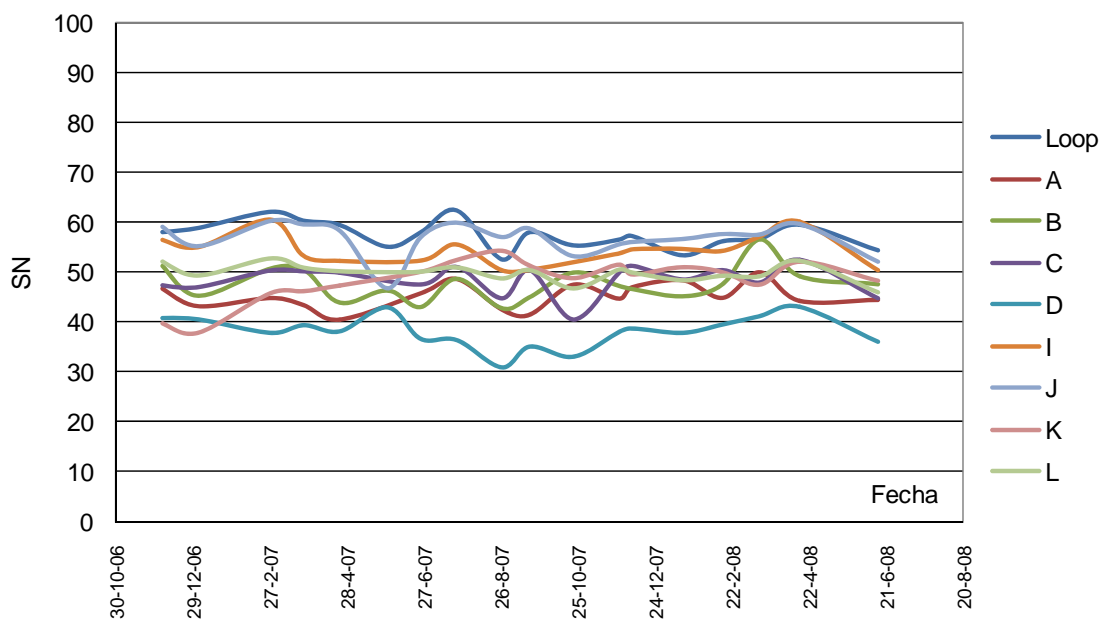


Figura 3.3. Mediciones con Trailer de rueda bloqueada, sentido E, 64 Km/h

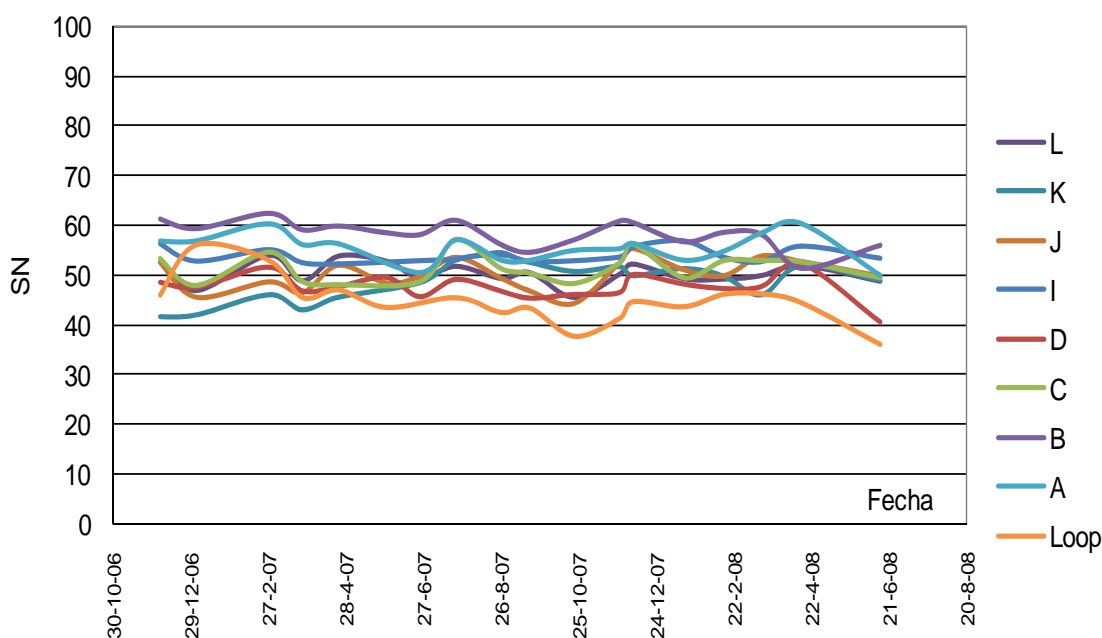


Figura 3.4. Mediciones con Trailer de rueda bloqueada, sentido W, 64 Km/h

### 3.1.6. Mediciones de coeficiente de fricción con DFT Tester

Se realizaron mediciones repetidas durante casi dos años, las secciones fueron medidas en dos direcciones identificadas como E y W.

Las mediciones de este equipo se realizan a distintas velocidades, siendo 20 Km/h, 32 Km/h, 64 Km/h y 80 Km/h las realizadas en esta oportunidad.

En las Figuras 3.5 y 3.6 se encuentran graficados los resultados obtenidos a 20 Km/h, mientras que en el Anexo 2 se encuentran las tablas con los resultados numéricos.

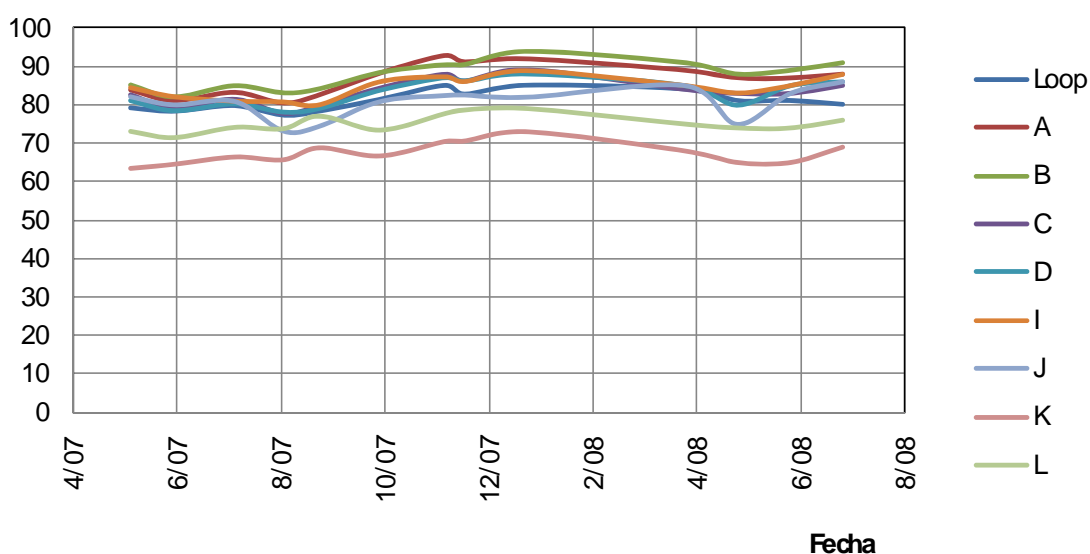


Figura 3.5. Mediciones con DFTTester, sentido E, 20 Km/h

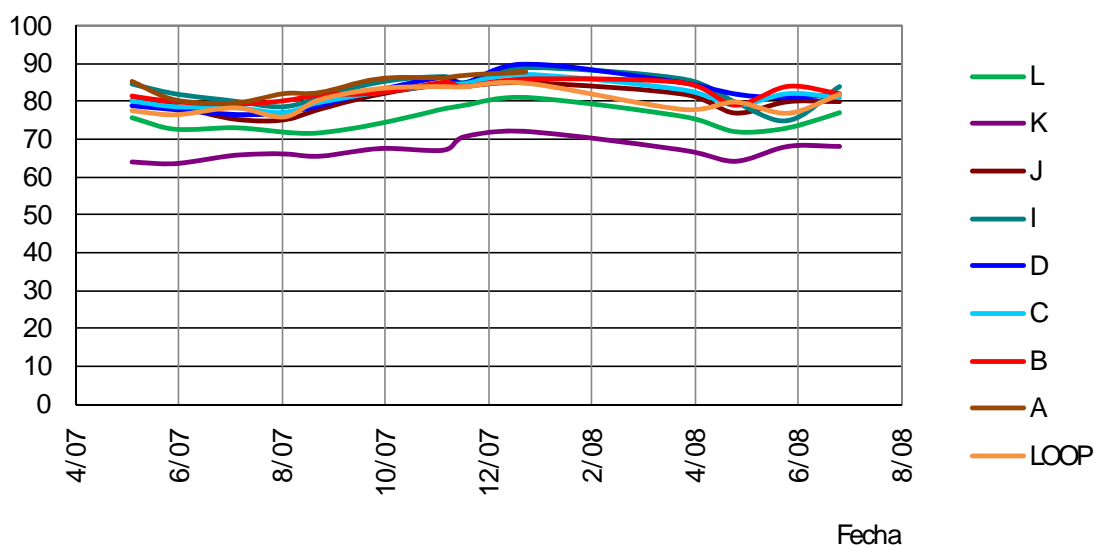


Figura 3.6. Mediciones con DFTester, sentido W, 20 Km/h

### 3.1.7. Mediciones de macrotextura con CTMeter

Estas mediciones puntuales sobre la superficie se realizaron en las mismas fechas y lugares que las correspondientes al coeficiente de fricción con DFTester. Figuras 3.7 y 3.8.

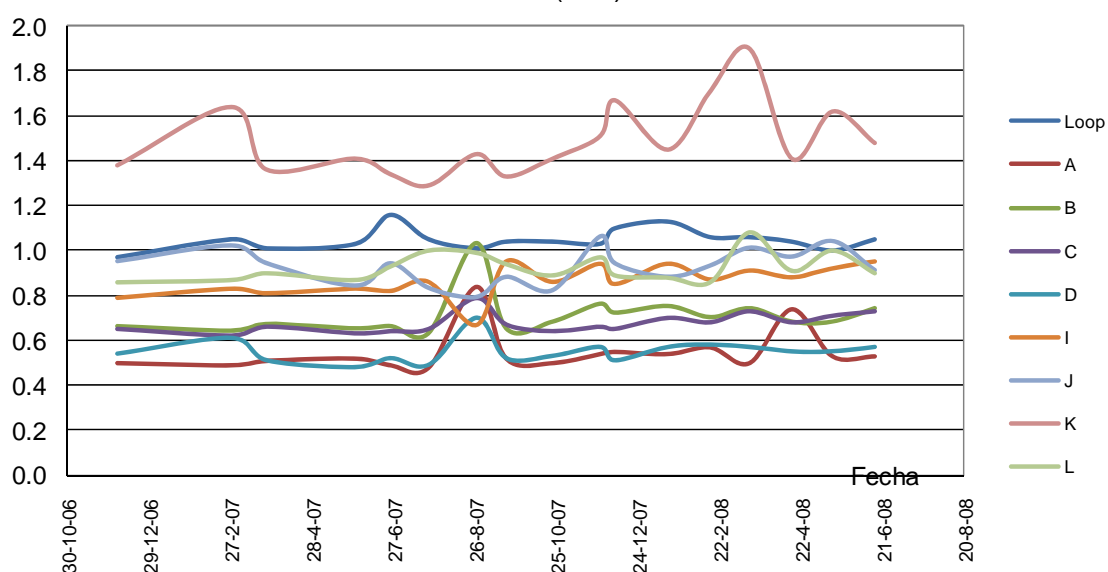


Figura 3.7. Resultados de macrotextura con CTMeter (mm), sentido E

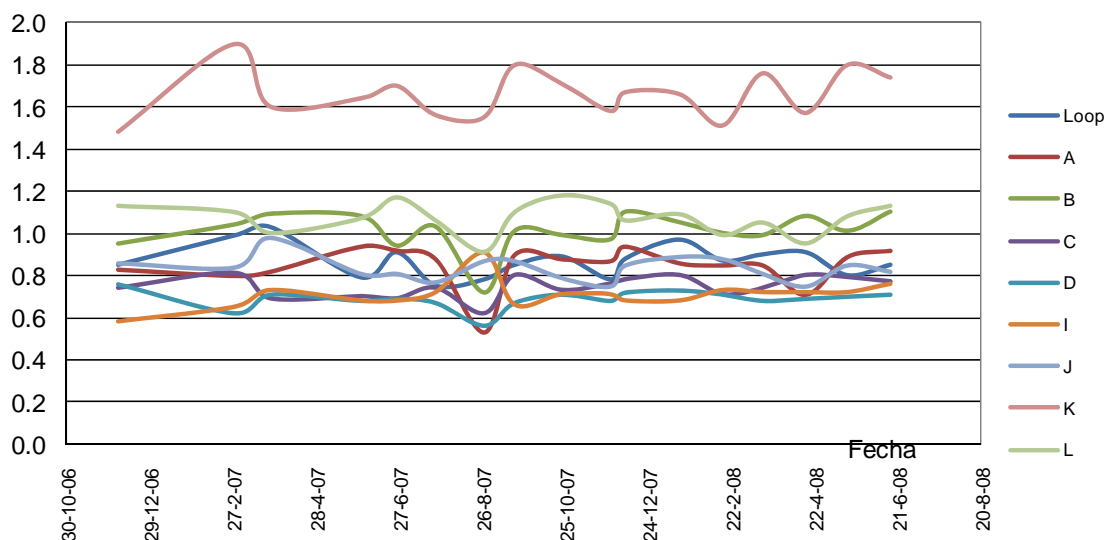


Figura 3.8. Resultados de macrotextura con CTMeter (mm), sentido W

Los resultados para las mezclas asfálticas se encuentran entre 0.5 mm y 1.2 mm. Mientras que para la mezcla asfáltica tipo OGFC (open grade friction course), capa drenante, los valores de macrotextura son superiores a 1.4 mm (en las gráficas se destaca por estar con valores más altos que todas las curvas, identificada con leyenda K).

### 3.2 Tramos en Aeropuerto

Estos resultados corresponden a 3 tramos ubicados en un aeropuerto localizado a 150 Km de la Ciudad de Rosario. Los mismos se ubicaron en sectores sin tránsito, fundamentalmente fuera de la zona de aterrizaje y carreteo de los aviones. Así es que se definieron dos tramos en los laterales de la pista de aterrizaje, uno en superficie asfáltica envejecida y otro con carpeta asfáltica nueva, y un tramo ubicado en el sector de carreteo, con superficie asfáltica nueva.

En este caso, para todas las superficies asfálticas se utilizó el mismo agregado pétreo granítico procedente de la Provincia de Córdoba.



Se realizaron mediciones puntuales de coeficiente de fricción con Péndulo de Fricción tipo TRRL y de macrotextura con Círculo de Arena, completando 5 mediciones desde septiembre 2004 hasta abril 2006, en distintas condiciones de época del año y temperatura.

Los datos climáticos se tomaron de la estación meteorológica del propio aeropuerto, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional.

Estos resultados han permitido el análisis de la influencia que la temperatura tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con Péndulo de Fricción y de la adherencia neumático calzada expresada en IFI.

### 3.2.1. Resultados obtenidos

En la Tabla 3.3 se observan los resultados obtenidos para los tres tramos. De los resultados de coeficiente de fricción se muestran los valores medidos, sin ninguna corrección por temperatura. Figuras 3.9 y 3.10.

Resultados obtenidos				
	FECHA	HS [mm]	BPN medido	Temp agua
PISTA VIEJA	2-9-04	0.32	71	20
	7-12-04	0.27	66	30
	27-5-05	0.32	72	18
	20-12-05	0.32	69	40
	18-4-06	0.40	77	20
PISTA NUEVA	2-9-04	0.57	68	20
	7-12-04	0.56	60	30
	27-5-05	0.42	71	19
	20-12-05	0.37	60	40
	18-4-06	0.48	69	20
CARRETEO	2-9-04	1.23	83	20
	7-12-04	1.15	80	30
	27-5-05	1.31	85	23
	20-12-05	1.37	79	40
	18-4-06	1.23	81	20

Tabla 3.3. Resultados obtenidos en Aeropuerto

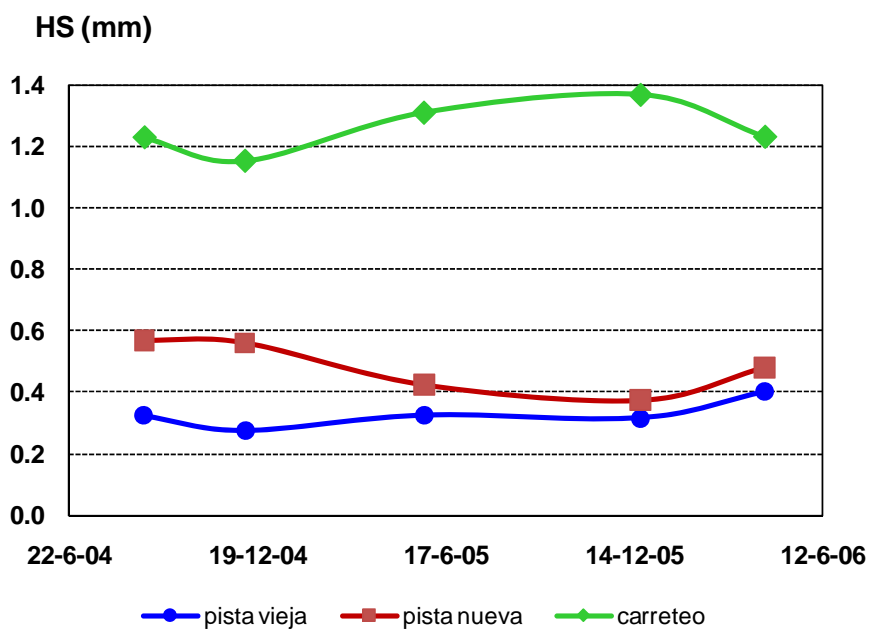


Figura 3.9. Valores medidos de macrotextura HS (mm)

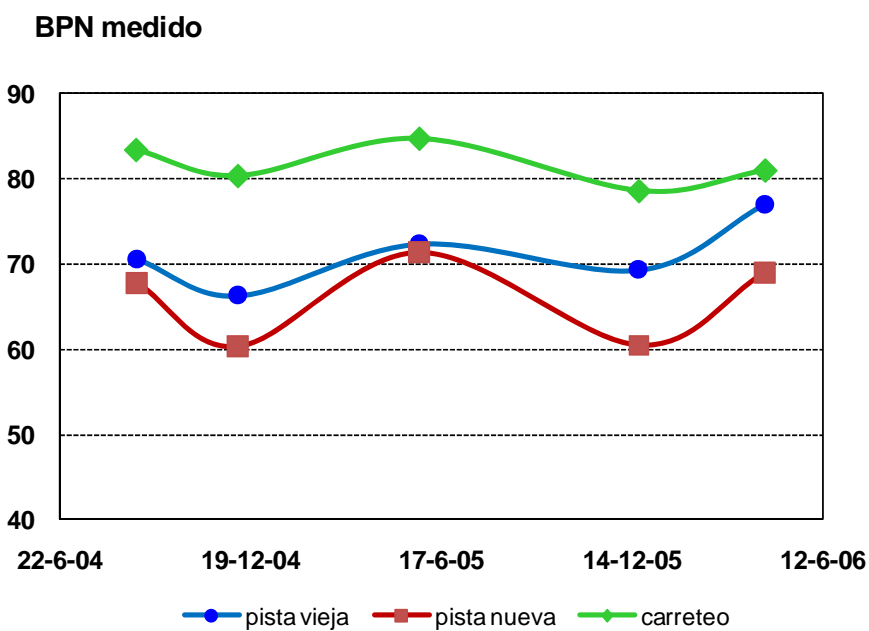


Figura 3.10. Valores de BPN medidos

### 3.3 Tramos en Autopista con tránsito elevado

En este caso, se realizó el análisis sobre 16 tramos de ruta en servicio bajo tránsito. Los tramos se encuentran ubicados en una autopista con elevado volumen de tránsito y cinco carriles por sentido de circulación.

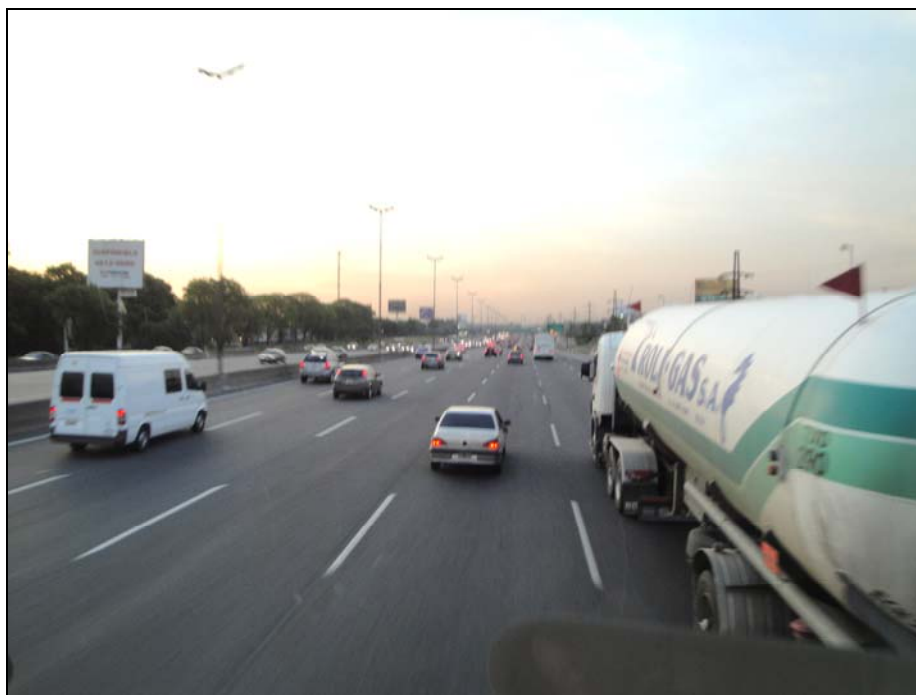


Figura 3.11. Vista Autopista

Los 16 tramos tienen la misma carpeta de rodamiento asfáltica, formada por una mezcla asfáltica tipo F10 del Pliego Español PG3, mezcla asfáltica discontinua en caliente, de pequeño espesor, de alta macrotextura y con asfaltos modificados con polímeros. El agregado pétreo de la misma es de origen granítico, procedente de la Provincia de Buenos Aires.

Los datos climáticos de la zona han sido obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional.

Se realizaron mediciones periódicas de coeficiente de fricción con Péndulo de Fricción tipo TRRL y de macrotextura con Círculo de Arena, en la huella



externa del carril. Se dispone de resultados anuales desde el año 1999 (fecha de construcción) hasta el año 2010, con 11 años de servicio bajo tránsito.

Se dispone de datos de tránsito de los años 1999 y 2004, TMDA y composición, recogidos por la misma empresa concesionaria de la autopista donde se encuentran ubicados los tramos.

Son 16 tramos de aproximadamente 300 metros de longitud, ubicados en un sector de 4 kilómetros con separación 1 Km entre sí, en una autopista de 5 carriles por sentido de circulación con elevado volumen de tránsito.

Hay 4 tramos por carril, en cuatro carriles de la autopista. Numerando los carriles desde el centro, los tramos están en los carriles 1, 2, 4 y 5. Los carriles 1 y 2 tienen tránsito rápido, fundamentalmente autos. Los carriles 4 y 5 tienen tránsito lento y circulan mayormente colectivos y camiones. Figura 3.12.

Banquina interna				
—	—	—	—	Carril 1
—	—	—	—	Carril 2
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	Carril 3
—	—	—	—	Carril 4
—	—	—	—	Carril 5
Banquina externa				

Figura 3.12. Esquema de ubicación de los tramos

Estos resultados han sido utilizados para desarrollar modelos de comportamiento que permitan predecir la evolución en el tiempo de los parámetros coeficiente de fricción, macrotextura y adherencia neumático calzada expresada en IFI, a partir de conocer el estado inicial recién construido y los agregados que componen la mezcla asfáltica. Siendo estos modelos



ajustados al lugar de desarrollo, a agregados de Argentina, y con las condiciones del tránsito solicitante en autopista.

### 3.3.1. Tipo de superficie de rodamiento

La superficie está formada por mezcla asfáltica tipo F10 del Pliego Español PG3: mezcla asfáltica discontinua en caliente, de pequeño espesor, de alta macrotextura y con asfaltos modificados con polímeros. (Cattaneo y Páramo, 2005) [30]. La superficie de rodamiento fue construida durante el año 1999.

Composición de la Mezcla	% en peso
Agregado granítico triturado 06 – 12	76.0
Arena granítica de trituración 0 – 03	12.0
Filler de calcáreo de aporte	5.7
Cal Hidratada	0.9
Cemento asfáltico modificado	5.4

Tabla 3.4. Composición de la mezcla asfáltica tipo F10

Granulometría Promedio de la Mezcla						
Tamices	12,5 mm (½")	9,5 mm (3/8")	4,8 mm (Nº 4)	2,4 mm (Nº 8)	590 µm (Nº 30)	74 µm (Nº 200)
% en peso que pasa	100	84,1	26,9	21,0	12,6	6,9
Entorno del huso F-10	100	75 – 97	25 – 40	20 – 35	12 - 25	7 – 10

Tabla 3.5. Granulometría de la mezcla

El cemento asfáltico empleado fue un asfalto base de penetración 70 – 100 1/10 mm, que se modificó en obra con la adición de un polímero del tipo SBS. Las características de este material y del árido grueso se indican en la Tabla 3.6.

Características del Cemento Asfáltico y el Agregado Grueso		
Material	Ensayo	Valores medios registrados
Cemento asfáltico	Viscosidad Rotacional a 135 °C	12,6 Poises
	Viscosidad Rotacional a 150 °C	6,6 Poises
	Viscosidad Rotacional a 170 °C	3,5 Poises
	Recuperación elástica torsional	78,6 %
	Penetración estándar	55,2 1/10 mm
	Punto de Ablandamiento anillo y esfera	71,7 °C
Agregado pétreo grueso	Desgaste Los Ángeles	23 %
	Pulimento acelerado	38 - 41
	Índice de lascas	12 – 20 %

Tabla 3.6. Características del Cemento asfáltico y el agregado grueso

Esta fue la primera vez que carpetas de rodamiento de estas características se construyeron en rutas de Argentina, y con la particularidad del elevado tránsito a que estarían sometidas.

Respecto a los parámetros relacionados con la adherencia neumático calzada se prestó especial atención a lograr una macrotextura superior a 1 mm, para lo cual se utilizó curva granulométrica discontinua y un cemento asfáltico modificado para que colabore a mantener el esqueleto granular en su lugar, sin deformación provocada por el tránsito.

Otro aspecto importante, es que se utilizaron agregados pétreos provenientes de la Provincia de Buenos Aires, estos materiales han sido tradicionalmente utilizados para mezclas asfálticas y son reconocidos como agregados con una buena resistencia en el ensayo Los Ángeles. Esta característica fue la más utilizada para caracterizar un agregado en Argentina, hasta que se comenzaron a analizar los agregados con el ensayo de Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA). Como puede verse en la tabla el agregado utilizado es de bajo valor de CPA, pero es el material granítico existente en Argentina y no existen otros materiales alternativos para reemplazarlo en Argentina con mejor valor de CPA a precios comparativos. (Luna Blanco et al, 2001) [31] (Pagola et al, 2003) [32].



### 3.3.2. Tránsito

Se dispone de datos de tránsito en el año 1999 y en el 2004: TMDA y composición por sentido y por carril, que fueron relevados por la empresa concesionaria de la ruta.

El tránsito medio diario anual (TMDA) para ambos sentidos de circulación, sobre las calzadas principales en el año 1999 fue de 184.500 vehículos. Este valor ha experimentado un ligero crecimiento hasta el año 2001 para decaer luego de la crisis político-económica existente en la Argentina. En el año 2004 el TMDA se ubicaba en el orden de 155.000 vehículos. La composición y distribución por carriles son las que se indican en la tabla siguiente:

Clasificación	Distribución y Clasificación del Tránsito por Carriles (%)				
	Carril 1	Carril 2	Carril 3	Carril 4	Carril 5
Automóviles	25,91	28,15	17,02	9,62	5,07
Camiones Livianos	0,05	0,19	2,33	2,39	1,92
Camiones Pesados	0,02	0,20	1,47	3,46	2,22
Volumen total	25,98	28,54	20,81	15,47	9,20

Tabla 3.7. Distribución y composición del tránsito en porcentaje

Esas composiciones, junto con los TMDA indicados para cada año, dan como resultado los n° de cada tipo de vehículo que circula anualmente en cada uno de los carriles.

1999 Distribución y nº vehículos del Tránsito por Carriles						
Clasificación	Carriles					Totales por Sentido
	1	2	3	4	5	
Automóviles nº	23902	25968	15701	8874	4677	79123
Camiones Livianos nº	46	175	2149	2205	1771	6347
Camiones Pesados nº	18	185	1356	3192	2048	6799
TMDA en el año 1999	23967	26328	19206	14271	8496	92268

Tabla 3.8. Volumen de tránsito y composición año 1999

2004 Distribución y nº vehículos del Tránsito por Carriles						
Clasificación	Carriles					Totales por Sentido
	1	2	3	4	5	
Automóviles nº	20080	21816	13191	7456	3929	66472
Camiones Livianos nº	39	147	1806	1852	1488	5332
Camiones Pesados nº	16	155	1139	2682	1721	5712
TMDA en el año 2004	20135	22119	16136	11989	7138	77516

Tabla 3.9. Volumen de tránsito y composición año 2004

### 3.3.3. Clima

Los tramos se encuentran cercanos a la Capital Federal. La temperatura presenta variaciones suaves, con valores medios en invierno de 10° C y en verano de 25°C. Las precipitaciones son abundantes, con un promedio anual de aproximadamente 100 mm/mes, con menor cantidad de lluvia caída en los meses invernales. Figura 3.13.

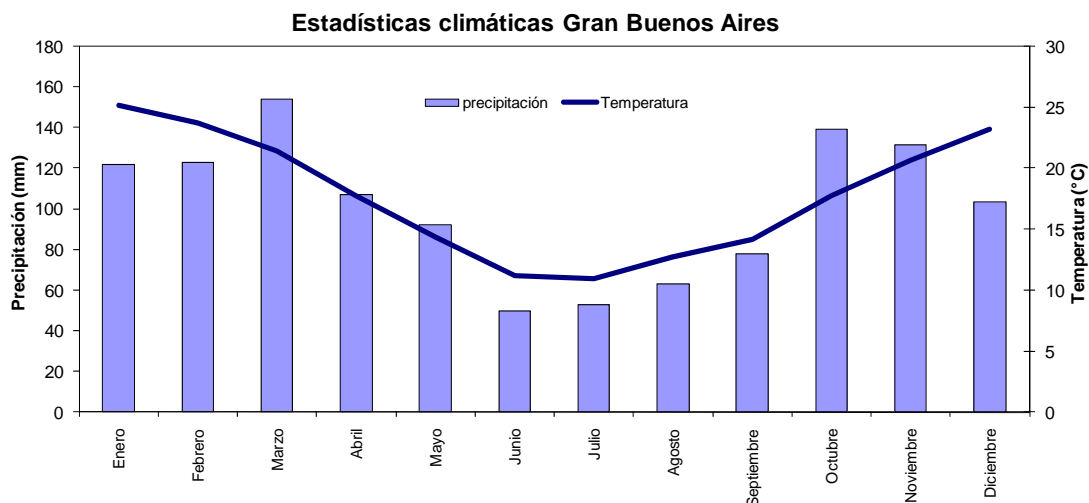


Figura 3.13. Distribución anual promedio de la temperatura del aire y de la precipitación

#### 3.3.4. Mediciones realizadas

Desde el año 1999, fecha de construcción de la carpeta de rodamiento, se realizaron mediciones periódicas de los siguientes parámetros:

- Coeficiente de fricción, medido con Péndulo de Fricción tipo TRRL, “BPN”
- Profundidad de la Macrotextura, con Círculo de Arena, “HS”

La periodicidad de las mediciones es anual, la Empresa concesionaria del tramo realizó las mismas una vez por año en distintas fechas.

Los resultados presentados en este trabajo de Coeficiente de Fricción se encuentran corregidos a una temperatura de 20°C, como se indica en la metodología de trabajo de la Norma IRAM 1555. En el Anexo se encuentran todos los resultados obtenidos, cada uno de los valores informados se corresponde con el promedio de 5 mediciones individuales.

En la Figura 3.14 se muestra la variación de la macrotextura en función de la fecha de medición, para los carriles 1, 2, 4 y 5, donde cada resultado graficado

es el promedio de los valores de macrotextura medidos para los 4 subtramos que se encuentran en cada carril. Mientras que en la Figura 3.15 se observa la variación del coeficiente de fricción, para los carriles 1, 2, 4 y 5, donde cada punto representa el valor medio de los resultados de coeficiente de fricción medidos en los 4 subtramos que se encuentran en cada carril.

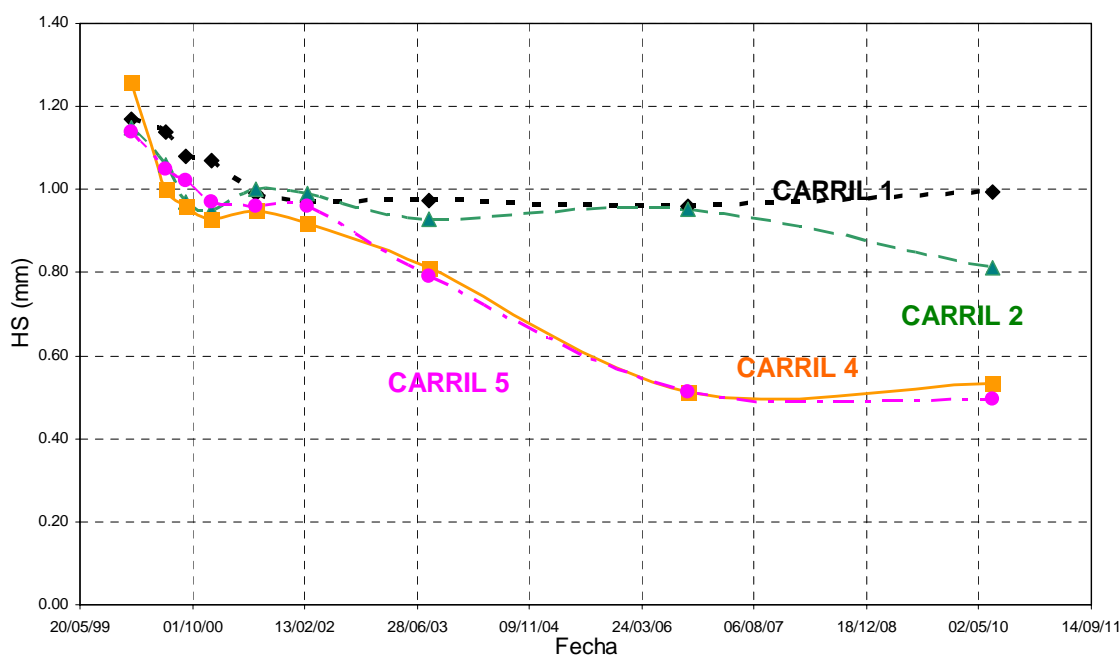


Figura 3.14. Resultados de macrotextura medida con parche de arena

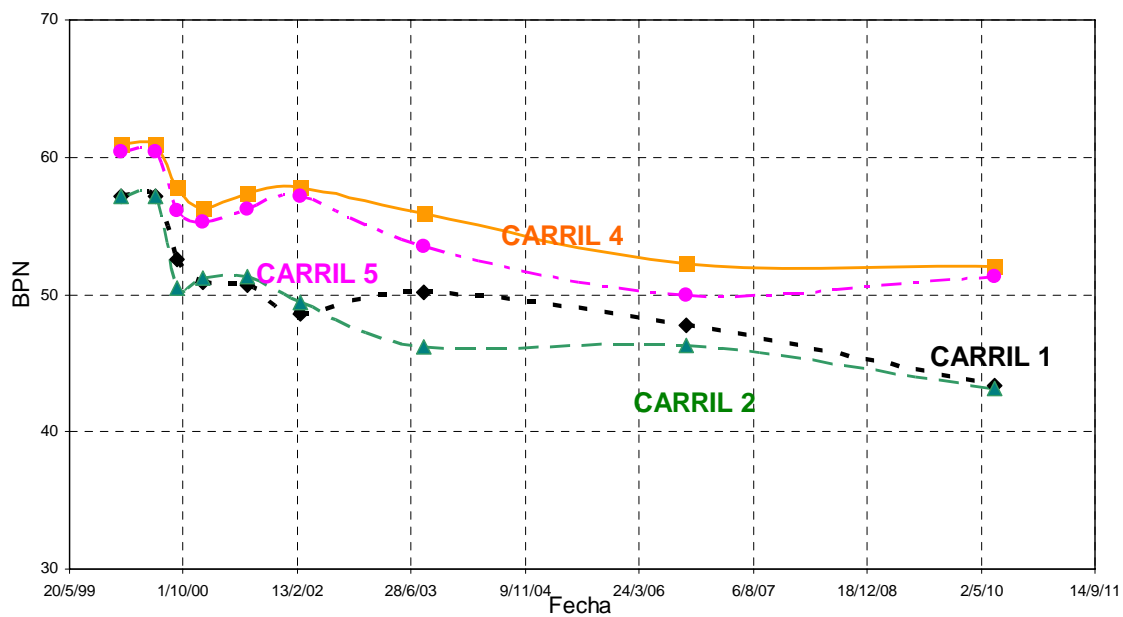


Figura 3.15. Resultados de coeficiente de fricción, medidos con Péndulo de Fricción





## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1 Tramos en Virginia Smart Road**

Estos resultados han permitido el análisis de la influencia que la temperatura tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con DFT y trailer de rueda bloqueada, sobre los resultados de textura, y sobre la adherencia neumático calzada expresada en IFI. Si bien estos tramos no representan las condiciones existentes en rutas de Argentina, los resultados del análisis obtenido pueden ser comparados con los obtenidos en tramos de rutas con agregados y equipos en uso en Argentina.

#### **4.1.1. Resultados de coeficiente de fricción con Trailer de rueda bloqueada**

Estos no presentan tendencia de pérdida de coeficiente de fricción con el tiempo, consecuencia lógica de no estar sometidos al uso por el tránsito. Presentan sí algunas variaciones, que se analizará si están asociadas a la variación de temperatura.

En la Tesis “Evaluation of pavement surface friction seasonal variations” del Ing Oscar Rodriguez, de enero 2009 desarrollada en Virginia Polytechnic Institute and State University, se analiza la variación estacional en estos tramos de ensayo. Se arriba a la conclusión de que los resultados de coeficiente de fricción medidos con el Trailer de rueda bloqueada presentan variación con la temperatura, presentando una tendencia decreciente con el incremento de temperatura. Se definen coeficientes de corrección con la temperatura para las mediciones periódicas realizadas en el Estado de Virginia que son de menor magnitud que los habitualmente utilizados en dicho Estado.

En la presente tesis se plantea el análisis de la influencia de la temperatura en la misma manera que es manejado en las mediciones realizadas con el Péndulo de Fricción TRRL. En la Figura 4.1 se encuentran graficados los

resultados de coeficiente de Fricción SN versus la temperatura media del aire para esa época del año obtenidos de la estación meteorológica, por ser estos mayor cantidad de datos de temperatura que los realmente medidos en los tramos. Esta relación indica que el coeficiente de fricción medido con Trailer de rueda bloqueada a 64 Km/h presenta una variación de 1 punto por cada 7.7 °C de variación de temperatura. Ó 0.13 unidades SN por cada °C de variación de temperatura.

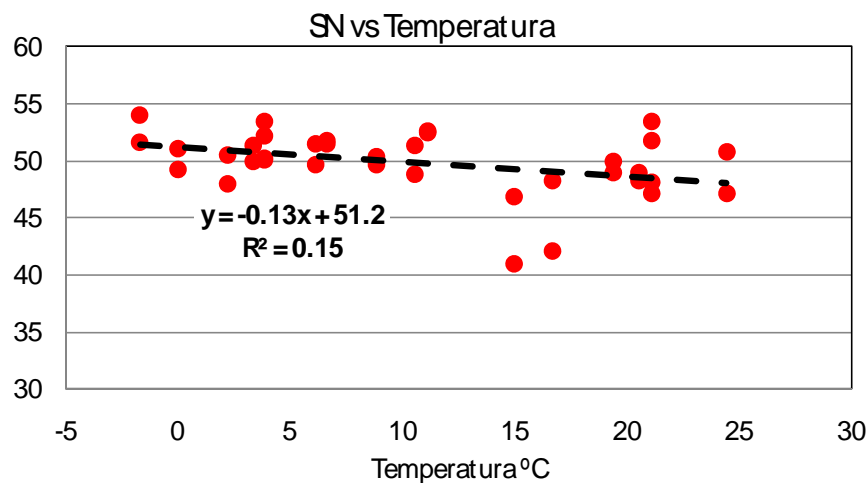


Figura 4.1. Variación del SN con la temperatura

Este mismo análisis puede realizarse con los coeficientes de corrección utilizados en Virginia y con los estimados en la Tesis de Oscar Rodriguez. Estos coeficientes tienen valor unitario en el mes de agosto, en correspondencia con la menor temperatura. Se han calculado entonces los SN estimados a partir del resultado medido en el mes de agosto y utilizando ambos coeficientes de corrección. En las Figuras 4.2 y 4.3 se encuentran las tendencias obtenidas.

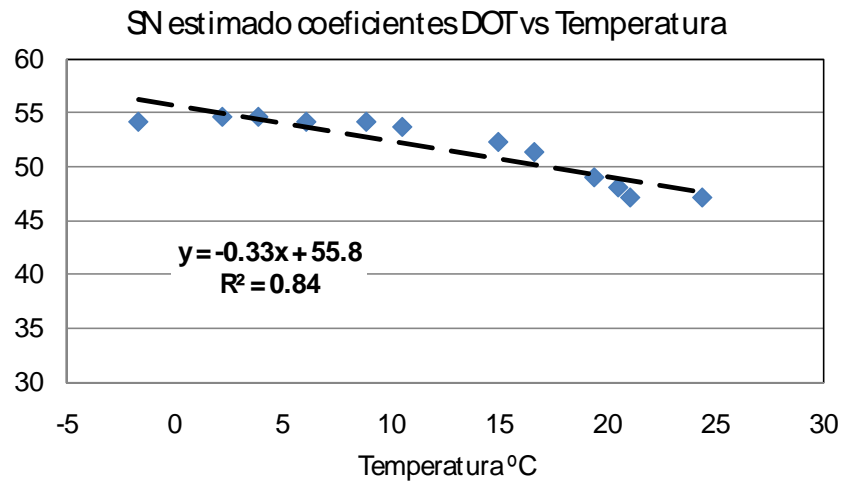


Figura 4.2. Variación del SN estimado con coef. DOT con la temperatura

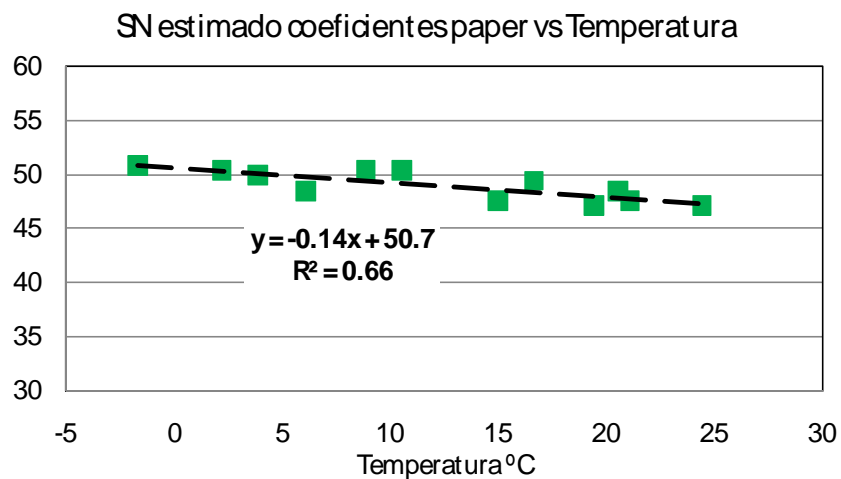


Figura 4.3. Variación del SN estimado con coef. tesis de Rodriguez con la temperatura

Para los coeficientes en uso en el estado de Virginia, la variación obtenida es de 1 punto de fricción cada 3.0 °C de temperatura, mientras que con los coeficientes propuestos en la tesis es de 1 punto cada 7.1°C, casi igual que el obtenido en el análisis mostrado en la gráfica de la Figura 4.1.

#### 4.1.2. Resultados de coeficiente de fricción con DFT

Estos presentan variación con la temperatura y tampoco tienen un

decrecimiento con el paso del tiempo, ya que los tramos no están sometidos a tránsito.

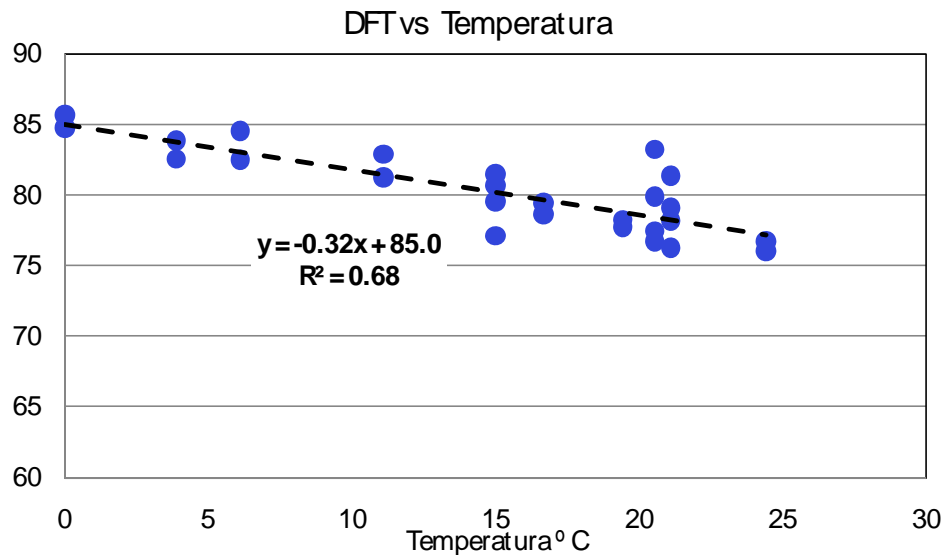


Figura 4.6. Variación del coeficiente DFT con la temperatura

El análisis de variación con la temperatura considerando todos los tramos en conjunto indica que es de 1 punto de fricción cada 3.1 °C de temperatura, Figura 4.6. Esta variación es igual que la observada en el Péndulo de Fricción.

#### 4.1.3. Resultados de macrotextura con CTmeter

En este punto se analizará si los resultados de macrotextura presentan variación asociada a la temperatura.

En la Figura 4.7 se encuentra graficado el promedio de la macrotextura medida para todos los tramos en conjunto, versus la temperatura del aire. La variación obtenida es de 0.005 mm por cada grado de temperatura.

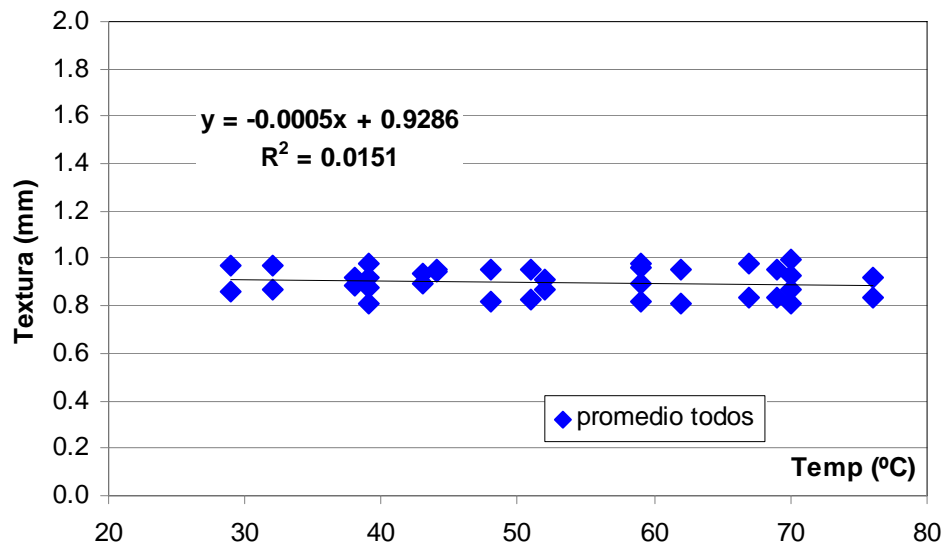


Figura 4.7. Variación de la macrotextura con la temperatura, para todos los tramos en conjunto

Considerando que el tramo K tiene como carpeta de rodamiento mezcla drenante, con características de mezcla particular y valores de macrotextura superiores a los demás tramos, se analiza si los resultados presentan tendencia diferenciada si no se considera este tramo. En la Figura 4.8 se observan dos conjuntos de resultados, unos corresponden al tramo K, y el otro al promedio de los otros tramos. Estas tendencias muestran que para el tramo de mezcla drenante la influencia es 0.0029 mm cada grado de temperatura, y para el resto de los tramos 0.0004 mm cada grado de temperatura. O sea que para la mezcla drenante la influencia es mayor, pero todavía sigue siendo de una magnitud despreciable.

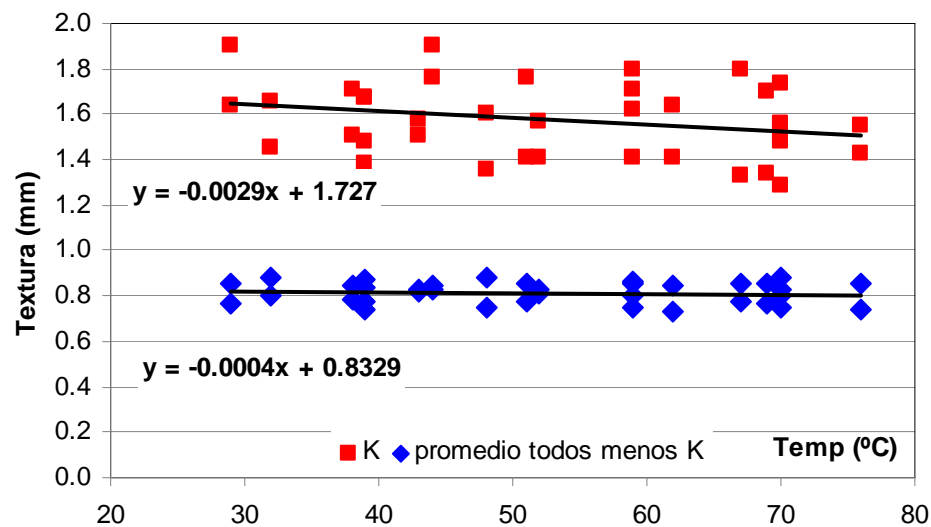


Figura 4.8. Variación de la macrotextura con la temperatura, considerando el tramo K en forma separada

#### 4.1.4. Análisis del coeficiente F60 del IFI

##### 4.1.4.1. Trailer de rueda bloqueada

En la Norma ASTM E 1960 se indican los coeficientes A, B y C de distintos equipos para calcular el parámetro F60. En este análisis se prefirió utilizar, para el cálculo del coeficiente F60 del IFI, los coeficientes revisados e indicados en la tesis “Evaluation of International Friction Index and high-friction surfaces, desarrollada en Virginia Polytechnic Institute and State University por Roa Julio en 2008. Considerando una velocidad de medición de 64 Km/h y el uso de neumáticos con dibujo, los coeficientes revisados son: A = 0.1905, B = 0.2925 y C = 0.0718.

Para la macrotextura medida con el equipo CTMeter se han utilizado los coeficientes indicados en la tesis citada previamente: a = 14.2 y b = 89.7.

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la variación del F60 obtenida para los tramos analizados.

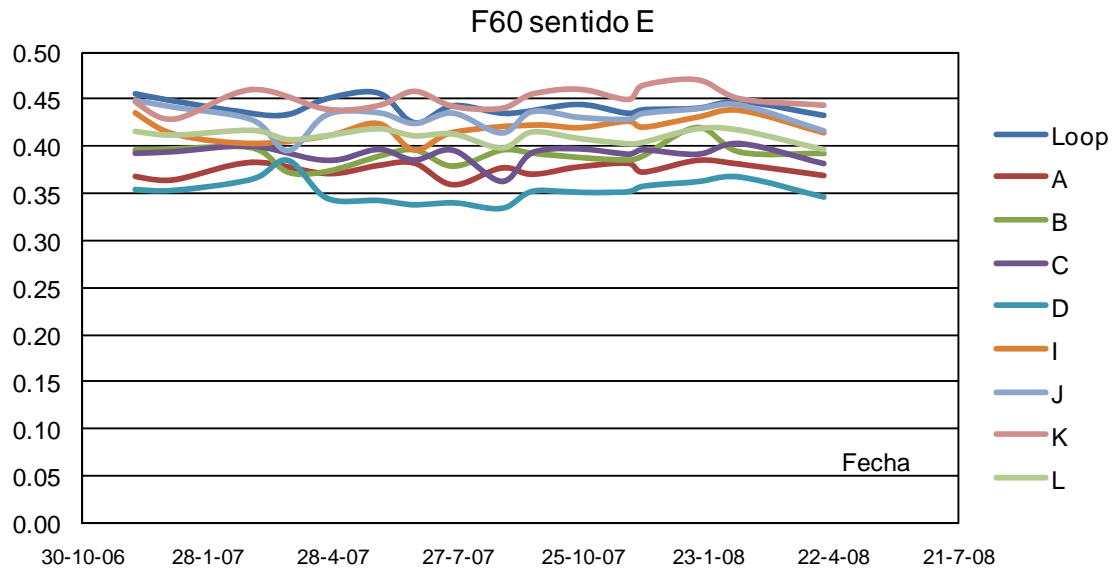


Figura 4.9. Variación del F60, tramos sentido E

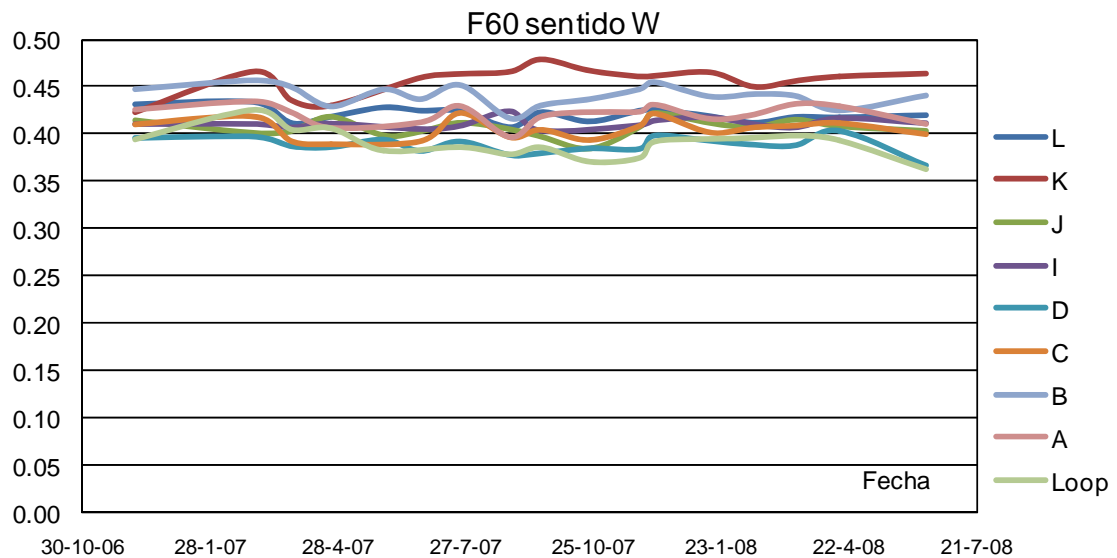


Figura 4.10. Variación del F60, tramos sentido W

Como se observa en las Figuras, el parámetro F60 no presenta variaciones apreciables, ni visualmente correlacionables con los distintos períodos del año. Igualmente, se planteó la variación con la temperatura, de igual manera que se realizó con los resultados de coeficiente de fricción. Los resultados obtenidos para los tramos E y W en conjunto, considerando el F60 promedio de todos los

tramos de cada sentido, son mostrados en la Figura 4.11. Esta indica que la variación es de 0.0004 unidades de F60 cada grado de temperatura, o sea que la misma es despreciable.

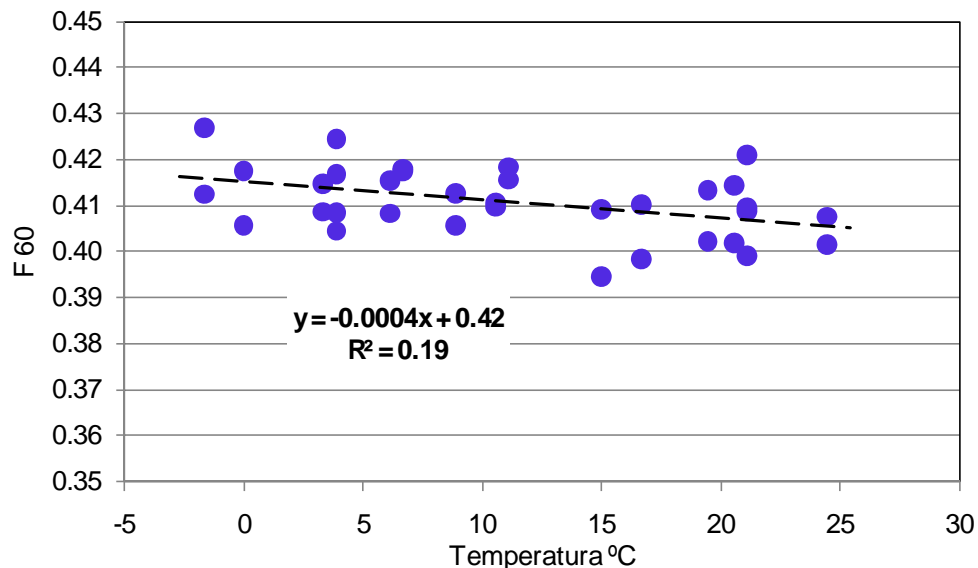


Figura 4.11. Variación del F60 con la temperatura, Trailer de rueda bloqueada

La variación observada en los resultados de coeficiente de fricción se ve totalmente anulada al analizar el mismo en forma conjunta con la macrotextura.

#### 4.1.4.2. DFTester

En la Norma ASTM E 1960 se indican los coeficientes A, B y C de distintos equipos para calcular el parámetro F60. En este análisis se utilizaron, para el cálculo del coeficiente F60 del IFI, los coeficientes para una velocidad de medición de 20 Km/h. Los coeficientes son: A = 0.081, B = 0.732 y C = 0.

Para la macrotextura medida con el equipo CTMeter se han utilizado los coeficientes indicados en la tesis citada previamente: a = 14.2 y b = 89.7.

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran la variación del F60 obtenida para los tramos analizados.



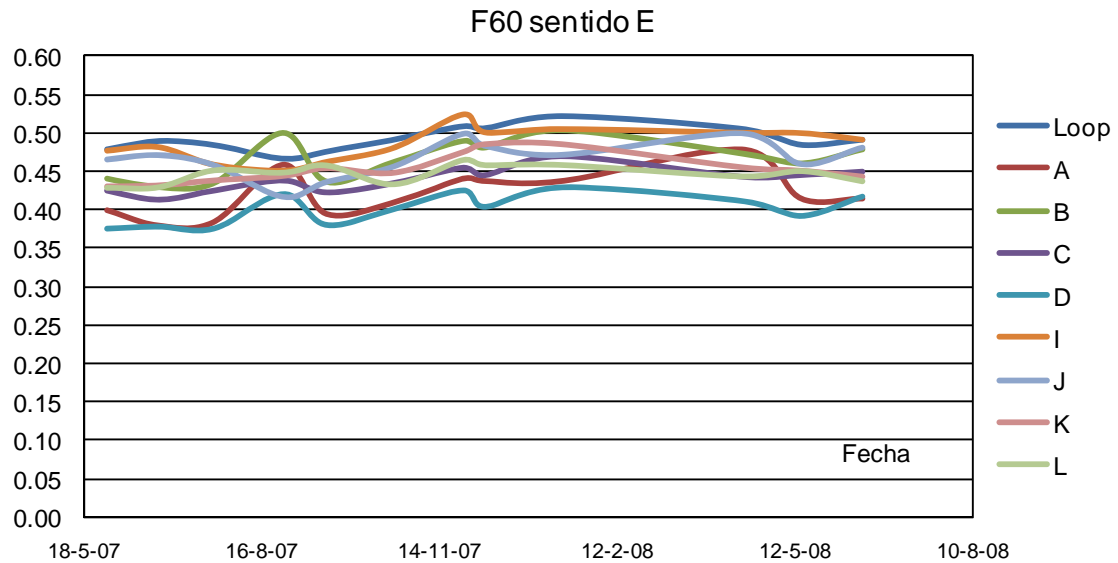


Figura 4.12. Variación del F60, tramos sentido E

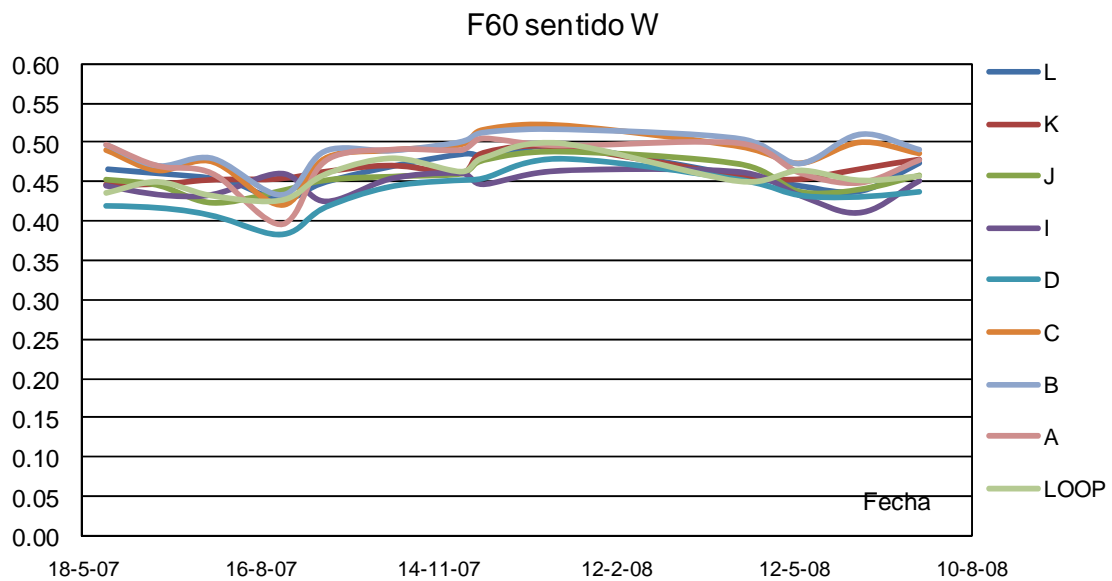


Figura 4.13. Variación del F60, tramos sentido W

Como se observa en las Figuras, el parámetro F60 no presenta grandes variaciones con los distintos períodos del año. Igualmente, se planteó la variación con la temperatura, de igual manera que se realizó con los resultados de coeficiente de fricción. Los resultados obtenidos para los tramos E y W en conjunto, considerando el F60 promedio de todos los tramos de cada sentido,

son mostrados en la Figura 4.14. La variación encontrada es de 0.002 unidades de F60 cada grado de temperatura. La misma es baja, pero mucho más importante que la observada en el punto anterior para el Trailer de rueda bloqueada.

Igualmente, la variación observada en los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con este equipo, se encuentra muy disminuida al analizar el mismo en forma conjunta con la macrotextura.

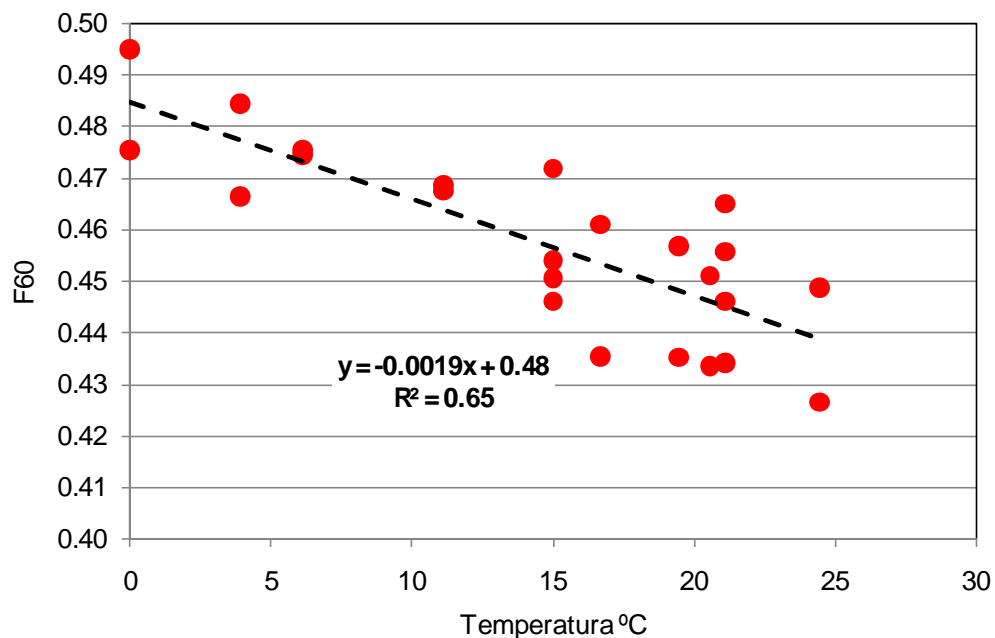


Figura 4.14. Variación del F60 con la temperatura, DFTester

#### 4.1.5. Conclusiones tramos Virginia Smart Road

Se ha obtenido la sensibilidad de los parámetros coeficiente de fricción medido con dos tipos de equipamiento, y del F60, con respecto a la temperatura, para los tramos con superficie asfáltica. En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de coeficientes obtenidos.

Parámetro / equipo	Variación observada	
SN - Trailer rueda bloqueada 64 Km/h	0.13 puntos SN cada °C	1 punto de SN c/ 7.7 °C
DFT – DFTester 20 Km/h	0.32 puntos DFT cada °C	1 punto de DFT c/ 3.1 °C
F60 - Trailer rueda bloqueada 64 Km/h	0.0004 unidades F60 cada °C	1 unidad F60 c/ 2500 °C
F60 - DFTester 20 Km/h	0.0019 unidades F60 cada °C	1 unidad F60 c/ 563 °C

Tabla 4.1. Resumen coeficientes de variación con la temperatura

Esto muestra que los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con el Trailer de rueda bloqueada se encuentran menos influenciados por la temperatura que los obtenidos con el DFTester, los coeficientes son la mitad de sensibles.

La diferencia en las influencias obtenidas para los resultados de coeficiente de fricción de los equipos y para el F60 se ve magnificada por el hecho de las diferentes escalas de medición. Para los equipos las escalas están consideradas de 0 a 100, mientras que para el F60 de 0 a 1. Si los resultados de los equipos se expresan en escala de 0 a 1, las influencias son 0.0013 para el Trailer rueda bloqueada a 64 Km/h, y 0.0032 para el DFTester a 20 Km/h.

## 4.2 Tramos en Aeropuerto

Estos resultados han permitido el análisis de la influencia que la temperatura tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con Péndulo de Fricción y de la adherencia neumático calzada expresada en IFI.

#### 4.2.1. Análisis de la influencia en los resultados de Péndulo de Fricción

Como se observa los resultados de coeficiente de fricción corregidos por temperatura y de macrotextura no han tenido variaciones en el tiempo, lo cual es lógico porque no han sido sometidos a tránsito.

Con estos datos se calcularon los resultados de coeficiente de fricción BPN corregidos a 20 °C y el F60 mostrados en la Tabla 4.2.

	FECHA	HS [mm]	BPN medido	Temp agua	BPN correg	F60 medido	F60 corregido
PISTA VIEJA	2-9-04	0.32	71	20	71	0.15	0.15
	7-12-04	0.27	66	30	69	0.11	0.12
	27-5-05	0.32	72	18	72	0.15	0.15
	20-12-05	0.32	69	40	76	0.14	0.15
	18-4-06	0.40	77	20	77	0.20	0.20
PISTA NUEVA	2-9-04	0.57	68	20	68	0.26	0.26
	7-12-04	0.56	60	30	63	0.24	0.25
	27-5-05	0.42	71	19	71	0.21	0.21
	20-12-05	0.37	60	40	67	0.16	0.17
	18-4-06	0.48	69	20	69	0.23	0.23
CARRETEO	2-9-04	1.23	83	20	83	0.48	0.48
	7-12-04	1.15	80	30	83	0.45	0.47
	27-5-05	1.31	85	23	86	0.49	0.50
	20-12-05	1.37	79	40	86	0.47	0.51
	18-4-06	1.23	81	20	81	0.47	0.47

Tabla 4.2. Resultados corregidos

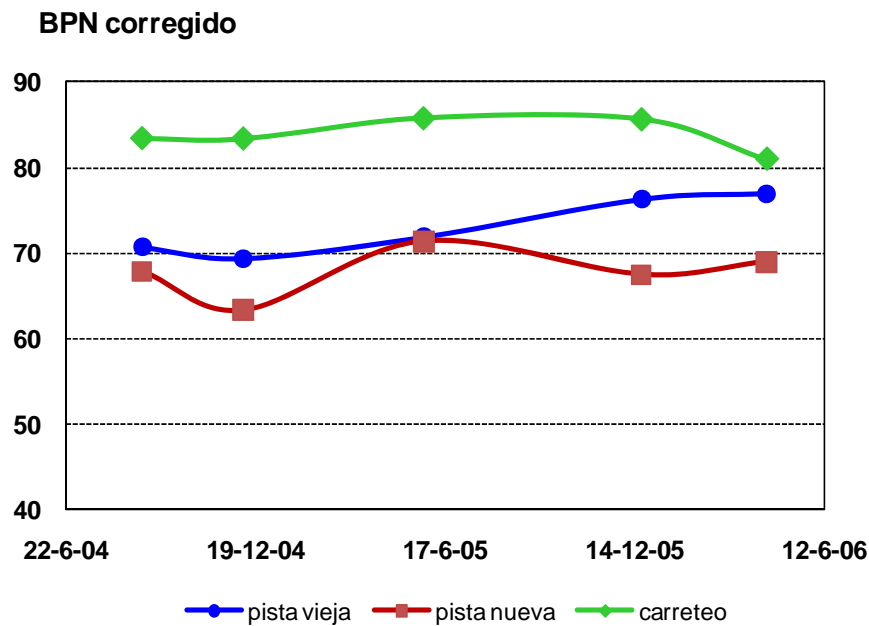


Figura 4.15. Valores de BPN corregidos a 20 °C

Como las mediciones han sido realizadas a distintas temperaturas fue posible analizar la influencia que la temperatura tiene en los resultados de coeficiente de fricción, y que según referencias bibliográficas y la metodología de ensayo adoptada en las normas es de 1 punto de BPN cada 3 °C de temperatura del agua remanente en superficie.

En las Figura 4.16 se muestran los resultados obtenidos de BPN versus la temperatura del agua remanente en superficie medida durante las tareas de campaña, para los tres tramos en forma separada. Mientras en la Tabla 4.3 se indican las influencias para cada uno de los tramos y para todos en conjunto.

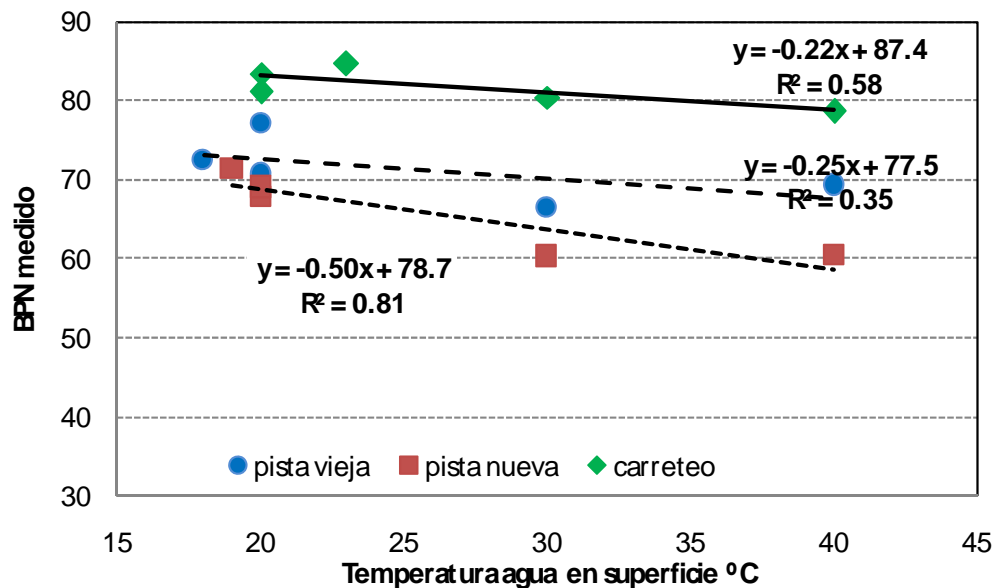


Figura 4.16. Valores de BPN medidos versus temperatura del agua remanente

Tramo	Tendencia
Carreteo	1 punto de BPN cada 4.5 °C
Pista nueva	1 punto de BPN cada 4.0 °C
Pista vieja	1 punto de BPN cada 2.0 °C
Promedio tramos	1 punto de BPN cada 3.5 °C

Tabla 4.3. Influencia de la temperatura obtenida para cada tramo

Los resultados indican que la influencia obtenida en las mediciones realizadas en estos tramos es de 1 punto de BPN cada 3.5 °C, muy similar a la que se indica en las normas de ensayo, con lo cual se refuerza la validez de la aplicabilidad de esta escala de corrección.

#### 4.2.2. Análisis de la influencia en los resultados de F60

Considerando la medición de macrotextura realizada con Círculo de Arena y la medición de fricción realizada con el Péndulo de Fricción, y utilizando las constantes  $a = -11.5981$ ,  $b = 113.63$ ,  $A = 0.07784$  y  $B = 0.00709$ , de los equipos

A8 (círculo de arena) y A14 (péndulo de fricción con zapatas ASTM) participantes en la experiencia IFI, se pudo calcular el parámetro F60 en estos tramos en base a los valores medidos y corregidos a 20 °C, Figuras 4.17 y 4.18.

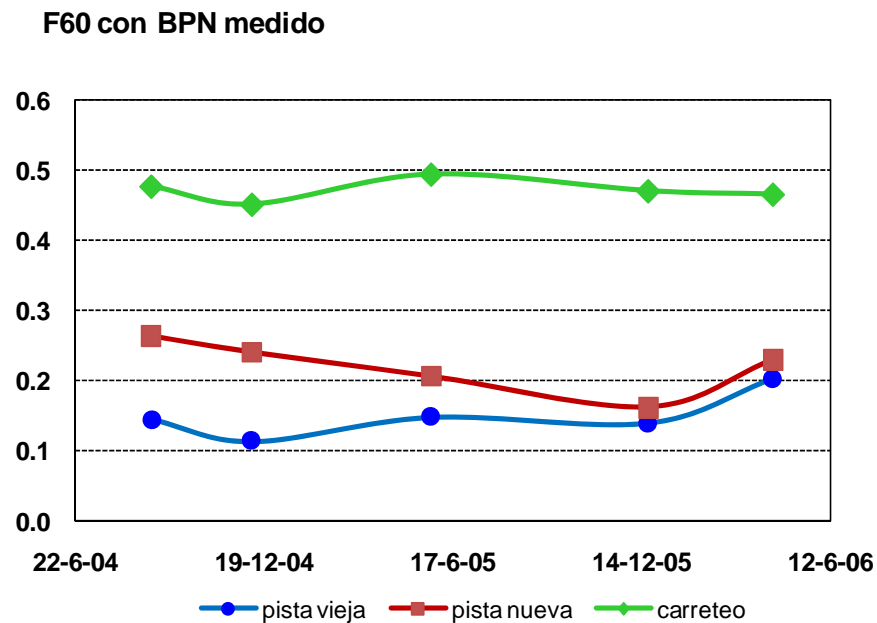


Figura 4.17. Valores de F60 con BPN medido

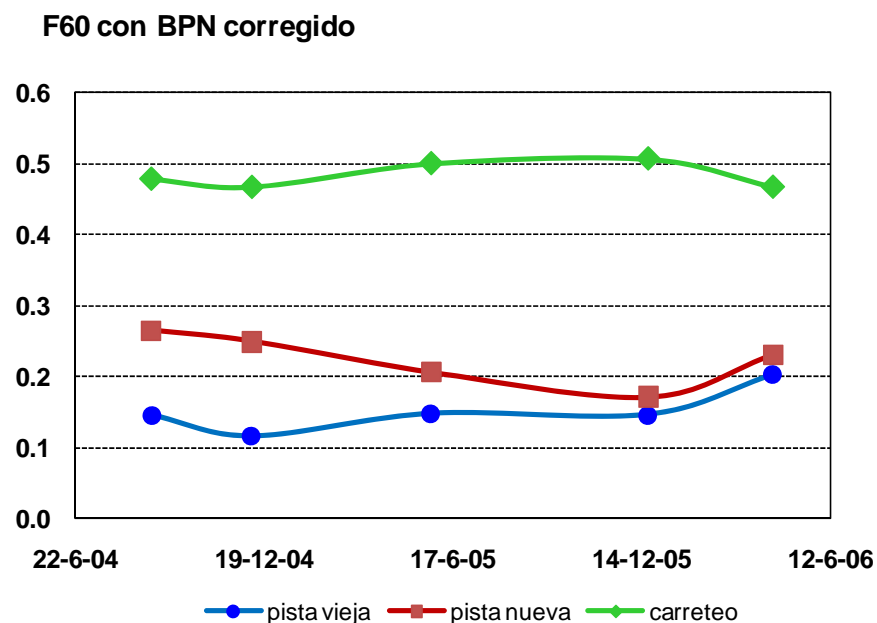


Figura 4.18. Valores de F60 con BPN corregido por temperatura

Analizando la influencia de la temperatura en el parámetro F60, se obtuvieron las tendencias mostradas en la Figura 4.19 para cada uno de los tramos. Como promedio de los tres tramos, se obtuvo 0.0017 puntos de F60 cada °C, la cual es semejante a la obtenida con el equipo DFTester a 20 Km/h.

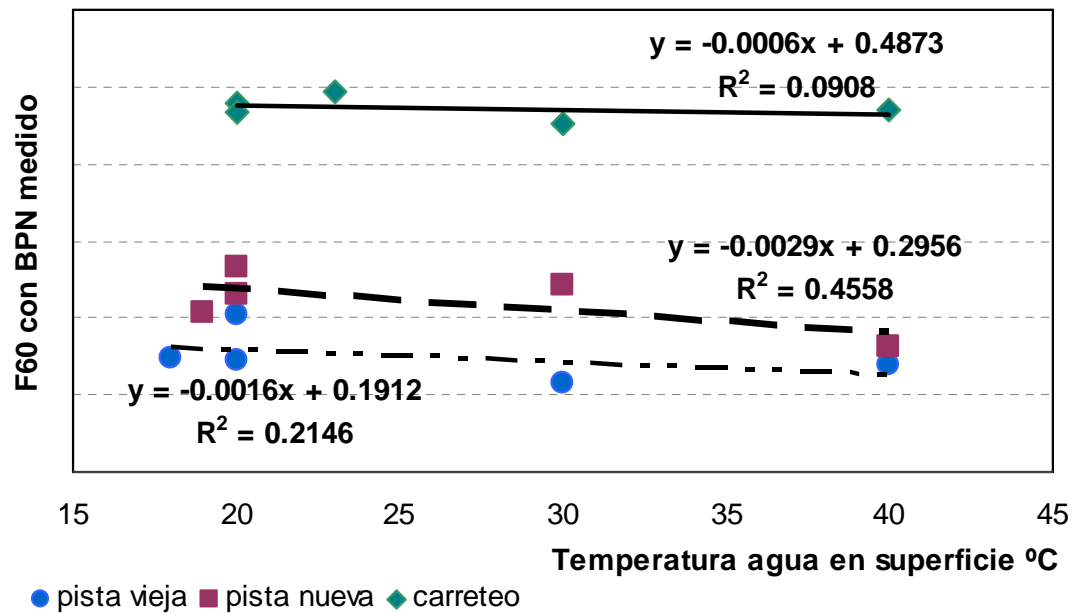


Figura 4.19. Valores de F60 versus temperatura del agua remanente

#### 4.3 Tramos en Autopista con tránsito elevado

Son 16 tramos de aproximadamente 300 metros de longitud, ubicados en un sector de 4 kilómetros con separación 1 Km entre sí, en una autopista de 5 carriles por sentido de circulación con elevado volumen de tránsito. [30] [34].

Desde el año 1999, fecha de construcción de la carpeta de rodamiento, se realizaron mediciones periódicas de los siguientes parámetros:

- Coeficiente de fricción, medido con Péndulo de Fricción tipo TRRL, “BPN”
- Profundidad de la Macrotextura, con Círculo de Arena, “HS” (MTD)



#### 4.3.1. Análisis comparativo entre los tramos 1 y 5 respecto al tránsito

Los tramos 1 se encuentran ubicados en el carril de tránsito rápido, con una elevada cantidad por día de vehículos livianos (23900 autos) y pocos camiones (46 livianos y 18 pesados). Mientras que los tramos 5 se encuentran en el otro extremo, con tránsito lento y pesado (4677 autos por día, 1777 camiones livianos y 2048 camiones pesados).

En el presente análisis se consideró la evolución del promedio de los resultados para cada uno de los grupos de tramos, o sea los cuatro subtramos que conforman los tramos 1 en forma conjunta, y de igual manera los tramos 5.

En la Figura 4.20 se muestra la variación de la macrotextura en función de la fecha de medición, para ambos tramos. Como se observa los tramos 5 tienen una disminución más importante en el valor de macrotextura que los tramos 1.

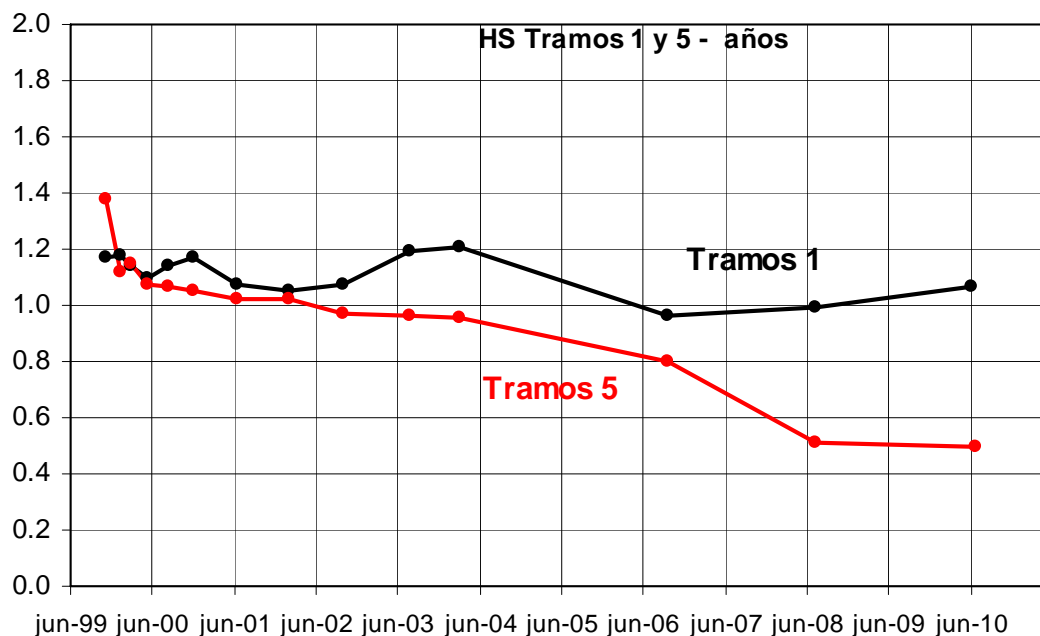


Figura 4.20. Variación de la macrotextura, tramos 1 y 5

En la Figura 4.21 se observa la variación del coeficiente de fricción, para los mismos tramos. Todos los tramos tienen una disminución de su valor inicial, siendo esta más notoria en los tramos 1 que en los tramos 5.

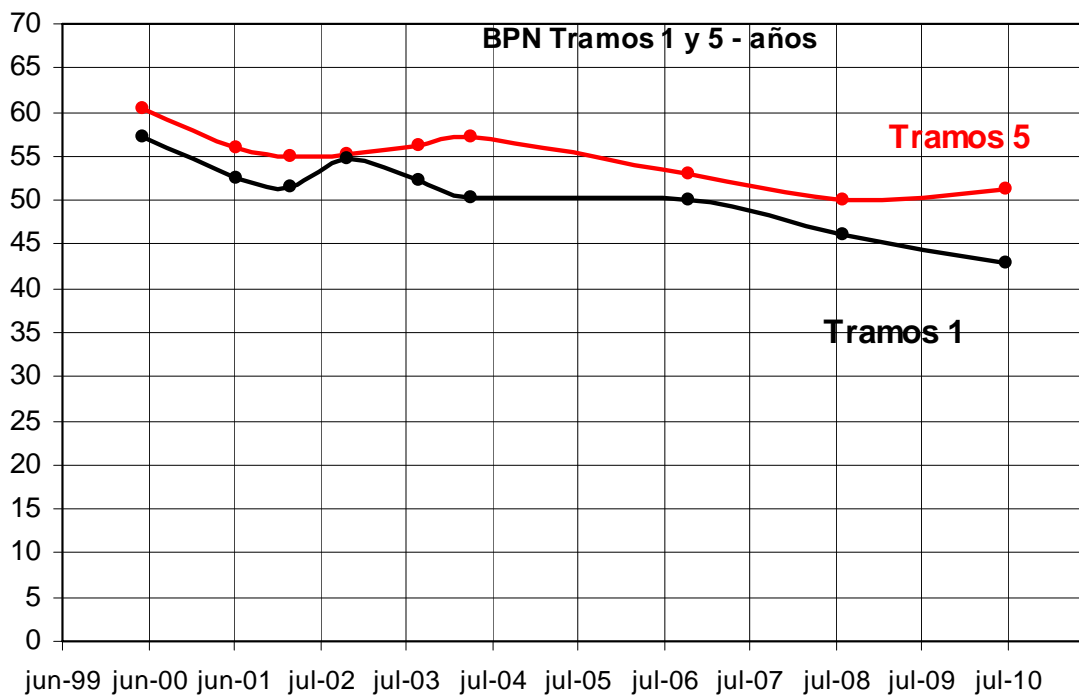


Figura 4.21. Variación del coeficiente de fricción, tramos 1 y 5

La evolución puede ser analizada respecto al tránsito solicitante, expresado como TMDA y como vehículos pesados, ya que el mismo no se mantiene constante en el tiempo y los dos tramos están sometidos a tránsitos diferentes. En este caso los comportamientos presentan otro aspecto. En las Figura 4.22 y 4.23 se observa la evolución de la macrotextura y del coeficiente de fricción, en función del TMDA acumulado.

Mientras que en las Figuras 4.24 y 4.25 se observan los mismos parámetros en función de la cantidad de vehículos pesados “CVD” acumulados.

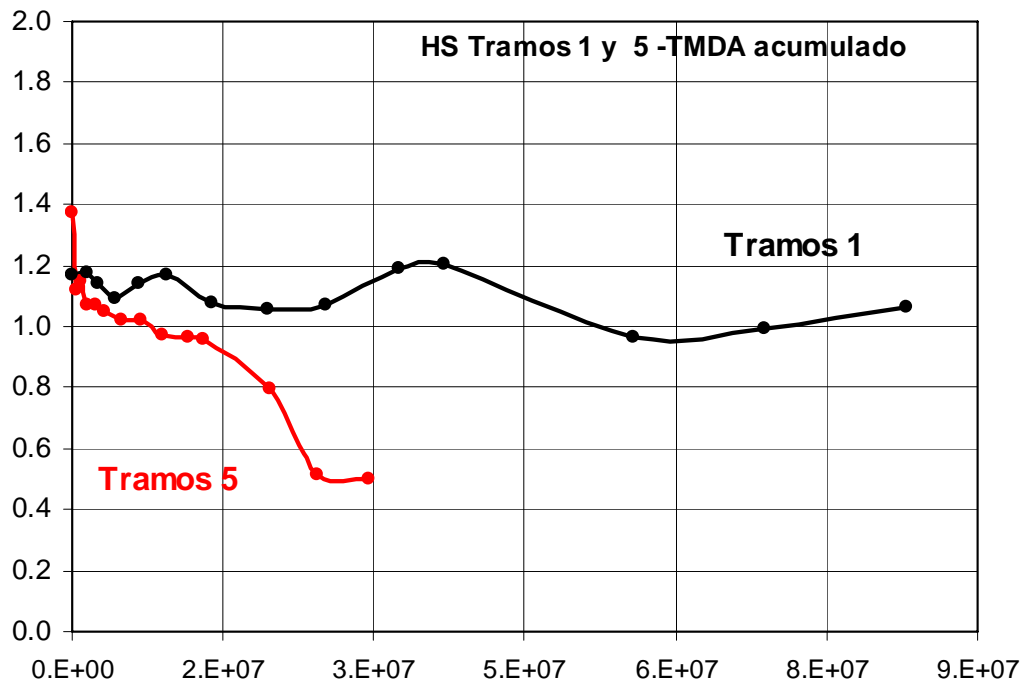


Figura 4.22. Variación de HS con el TMDA acumulado

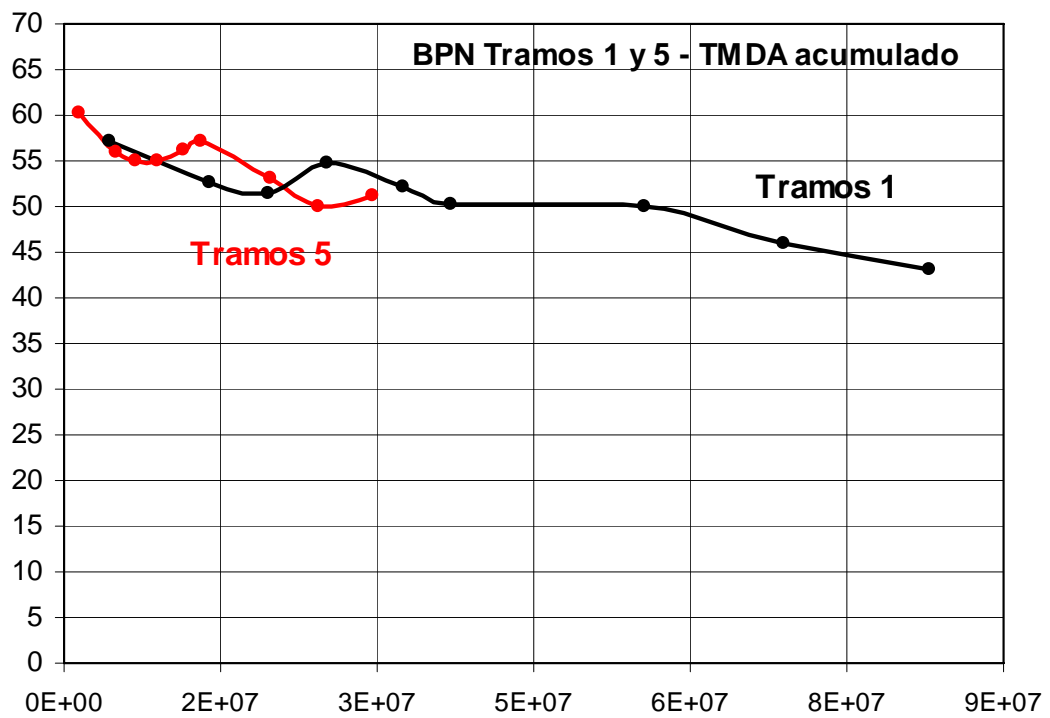


Figura 4.23. Variación de BPN con el TMDA acumulado

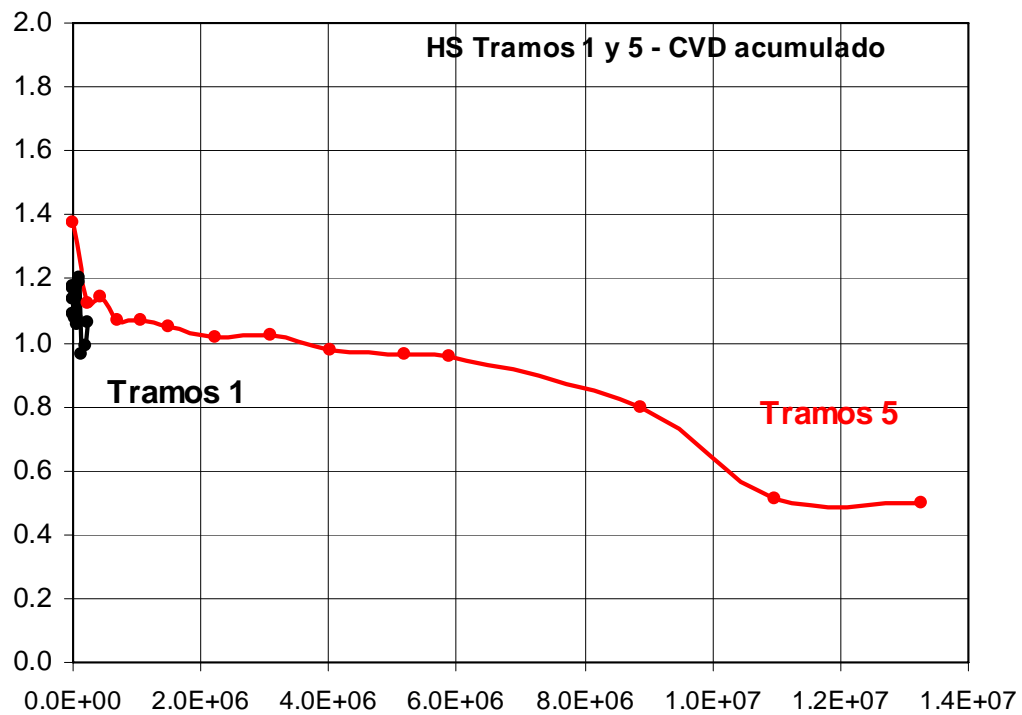


Figura 4.24. Variación de HS con el tránsito pesado acumulado

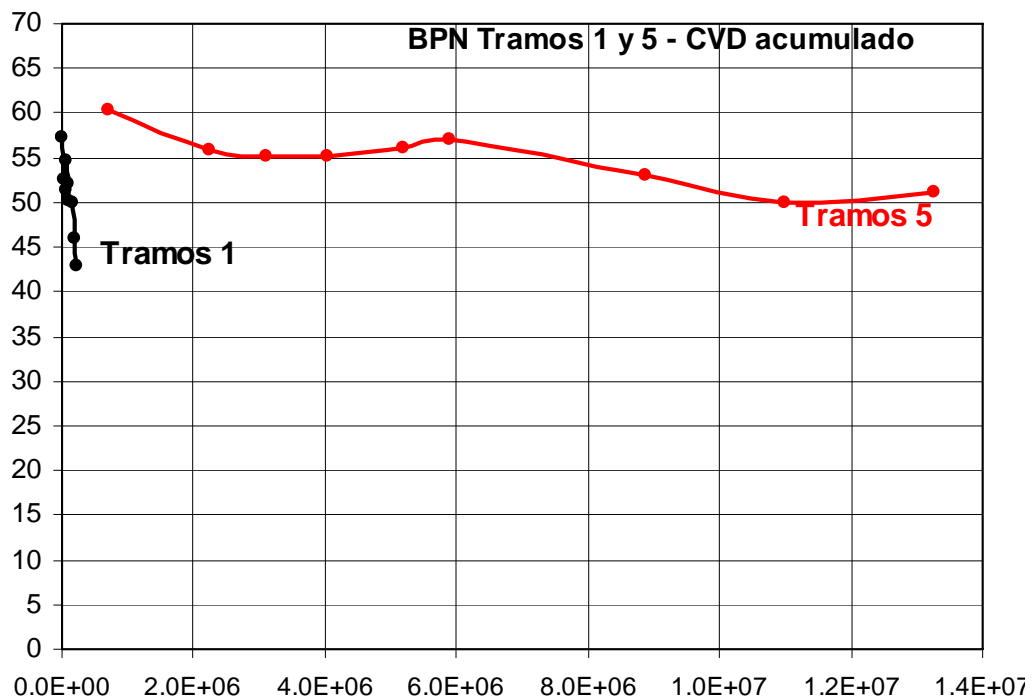


Figura 4.25. Variación de BPN con el tránsito pesado acumulado



Respecto a la acción del tránsito valorado en volumen, TMDA, se observa que los tramos 1 están sometidos a mayor volumen de tránsito y sin embargo su deterioro relativo en macrotextura es menor que en los tramos 5. Respecto al coeficiente de fricción se observa que la evolución de los tramos 5 es la misma que los tramos 1, sin llegar a los mismos valores ya que tampoco llegó a la cantidad de TMDA acumulado de los tramos 1.

En el análisis con el tránsito acumulado expresado en cantidad de vehículos pesados se observa que los tramos 1 casi ni aparecen representados en la gráfica, esto es debido a que están en el carril rápido con casi nula presencia de camiones.

De los comportamientos indicados en estas gráficas puede concluirse que la pérdida de macrotextura está fundamentalmente condicionada a la presencia de vehículos pesados, por eso los tramos 1 presentan poca disminución de su valor inicial. Respecto al coeficiente de fricción la tendencia observada es la contraria, ya que los tramos 1 presentan una mayor disminución respecto al valor inicial, comportamiento originado por el gran volumen de tránsito total TMDA que los solicita. Estos comportamientos ya fueron notados en las referencias bibliográficas, como ser en los modelos de evolución incorporados en el HDM 4.

#### 4.3.2. Análisis respecto a la temperatura

Este aspecto no puede ser analizado con este conjunto de datos, ya que las mediciones se realizaron en una única oportunidad en el año y, a que los resultados de BPN analizados se encuentran corregidos a una temperatura de 20°C.

#### 4.3.3. Análisis del valor mínimo del coeficiente de fricción

Según el modelo del TRRL indicado previamente, el valor mínimo de



coeficiente de fricción que puede tener la superficie, expresado en resultados del equipo Scrim, estaría dado por la siguiente expresión:

$$MSSC = [a \times CPA] - [b \times \ln(CVD)] + k$$

MSSC= coeficiente Scrim de verano

CPA= coeficiente de pulimento acelerado

CVD=vehículos comerciales pesados por línea por día

a, b, k= coeficientes de ajuste.

Según Szatkowski and Hosking, 1972,  $a = 6.18 \times 10^{-3}$ ,  $b = 2.25 \times 10^{-2}$  y  $k = 0.252$ .

Para los tramos 1, con CPA = 40 y CVD = 65, el valor de coeficiente de fricción expresado en unidades Scrim sería = 0.41.

Para los tramos 2, con CPA = 40 y CVD = 360, el valor de coeficiente de fricción expresado en unidades Scrim sería = 0.37.

No se han realizado mediciones periódicas con equipo Scrim, pero en abril de 2010 la DNV realizó mediciones en los tramos con su equipo Scrim Tex. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos, Como se observa, los resultados de ambos tramos son muy semejantes, y ambos manifiestan que no se arribó todavía al valor mínimo calculado con el modelo del TRRL.

Tramo	Scrim	promedio
1A	44	46
1B	48	
1C	44	
1D	46	
2A	46	47
2B	49	
2C	45	
2D	47	

Tabla 4.4. Mediciones con equipo Scrim Tex

Según esta respuesta, podría inferirse que:

- Como la macrotextura se mantiene en valores superiores a 0.5 mm, todavía existe espacio para que el agua se aloje en los huecos dejados por la macrotextura, y por lo tanto su influencia en la disminución del coeficiente de fricción por el momento no es importante.
- que los agregados no han sufrido aún el desgaste predicho en el ensayo de pulimento acelerado, con lo cual se comportan todavía con una microtextura superficial mayor. Aspecto puesto en evidencia, ya que el valor mínimo de BPN medido sobre la calzada (43) es todavía superior al valor de CPA calculado para los agregados utilizados en la carpeta de rodamiento (40).
- que las condiciones de servicio existentes en las calzadas de la autopista (lluvia y presencia de suciedad), son menos exigentes que las planteadas en el ensayo de los agregados, y por lo tanto en los 11 años de servicio no han alcanzado el valor mínimo predicho.

#### 4.3.4. Análisis del parámetro F60 del IFI

Considerando la medición de macrotextura realizada con Círculo de Arena y la medición de fricción realizada con el Péndulo de Fricción, y utilizando las constantes  $a = -11.5981$ ,  $b = 113.63$ ,  $A = 0.07784$  y  $B = 0.00709$ , de los equipos A8 (círculo de arena) y A14 (péndulo de fricción con zapatas ASTM) participantes en la experiencia IFI, se pudo calcular el parámetro F60 en estos tramos en base a los valores corregidos a 20 °C.

En el Anexo se encuentran los resultados obtenidos para los 16 tramos. En las Figura 4.26 a 4.28 se encuentran graficados los resultados correspondientes a los tramos 1 y 5.

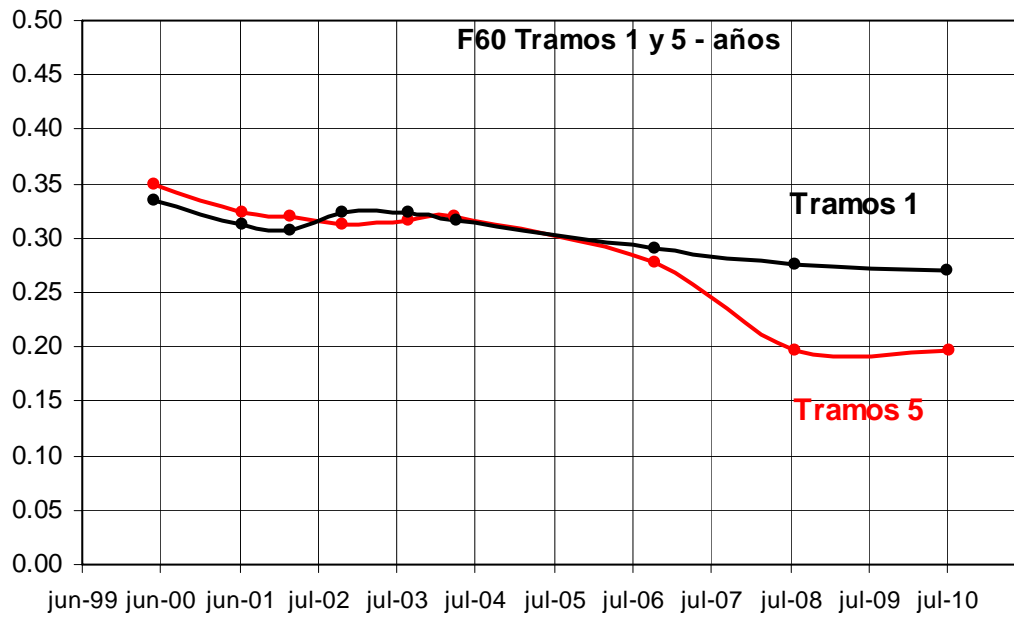


Figura 4.26. Variación del F60 con los años

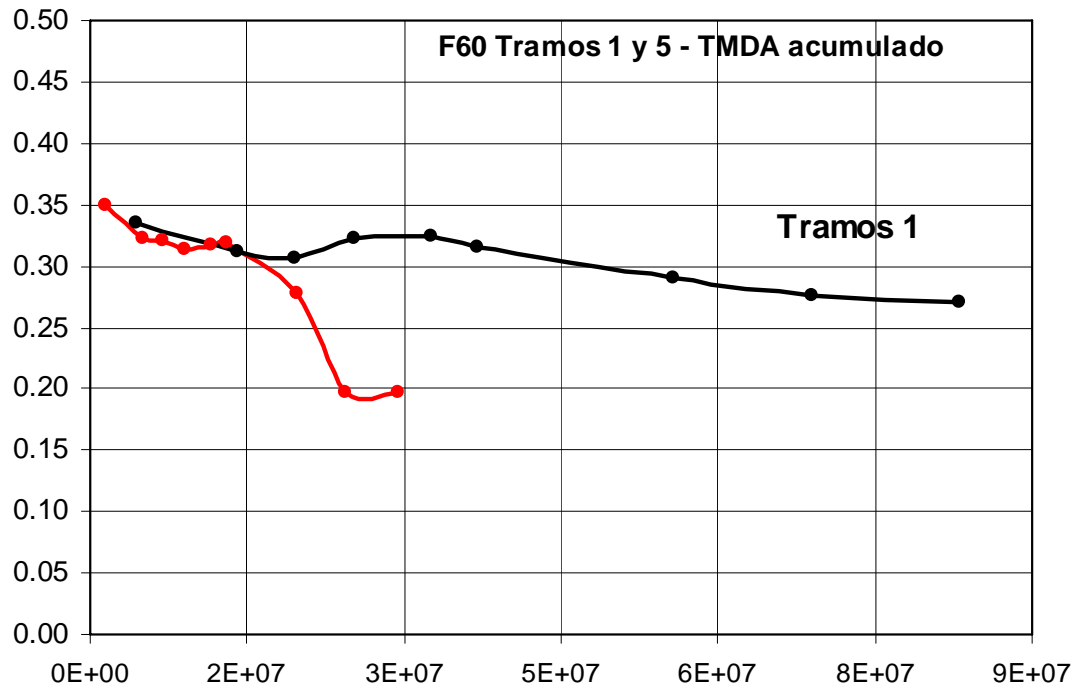


Figura 4.27. Variación del F60 con el TMDA acumulado



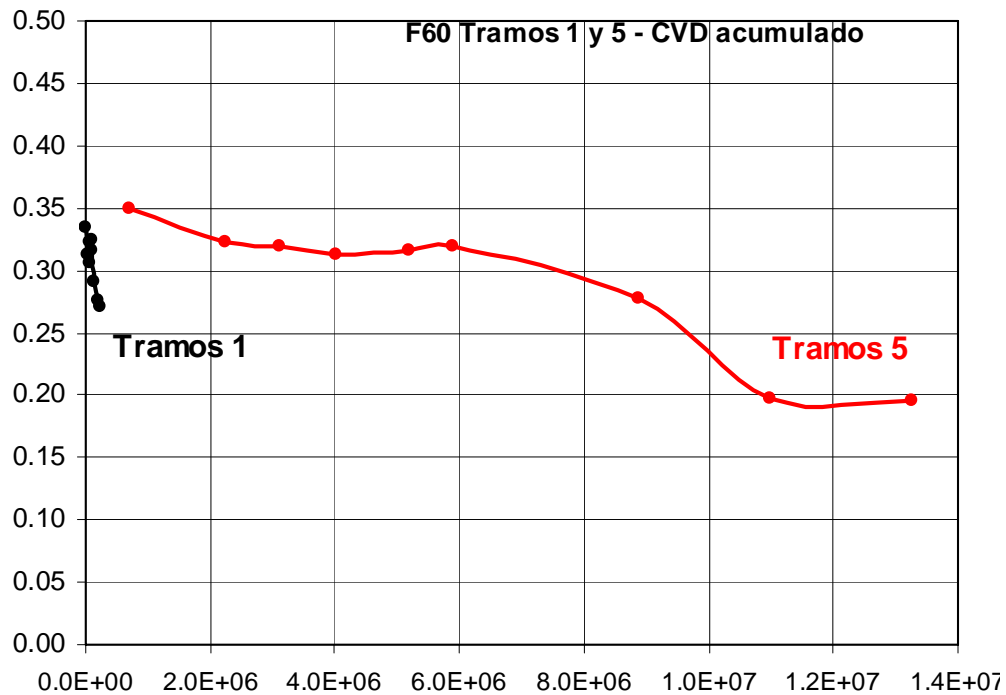


Figura 4.28. Variación del F60 con el tránsito pesado acumulado

En los tramos 1 y 5, los parámetros individuales y el F60 presentan la variación en el tiempo que se muestra en la Tabla 4.5.

TRAMOS	HS	BPN	F60
1	0.11	14	0.08
5	0.88	9	0.15

Tabla 4.5. Variaciones en los parámetros

Como puede observarse, la variación de este parámetro F60 está más influenciada por la variación que sufre la macrotextura que el coeficiente de fricción, o sea la disminución es mayor en los tramos que experimentaron una mayor pérdida de macrotextura.

#### 4.3.5. Análisis del Mu de Referencia

Según fue indicado previamente, las mediciones de adherencia neumático calzada realizadas con cualquier equipo son expresadas también en unidades de equipo Mu Meter, denominado Mu Ref. Esto es debido a que en nuestro país existen todavía algunos Pliegos de Especificaciones Técnicas que plantean el control del “coeficiente de fricción” en unidades Mu Meter.

Expresadas en este parámetro se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 4.29 a 4.31.

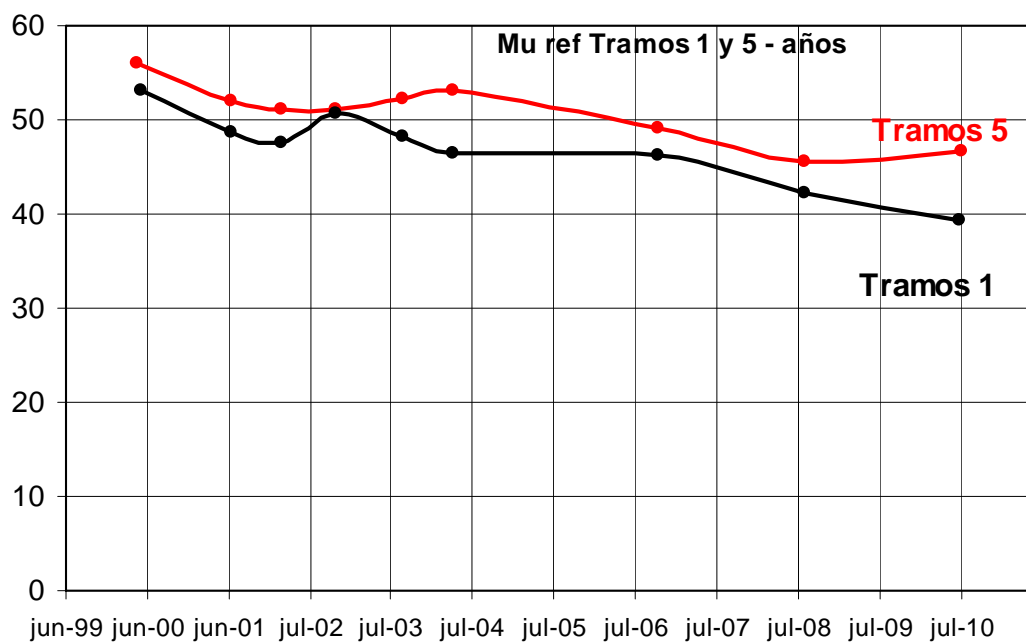


Figura 4.29. Variación del Mu Ref con los años

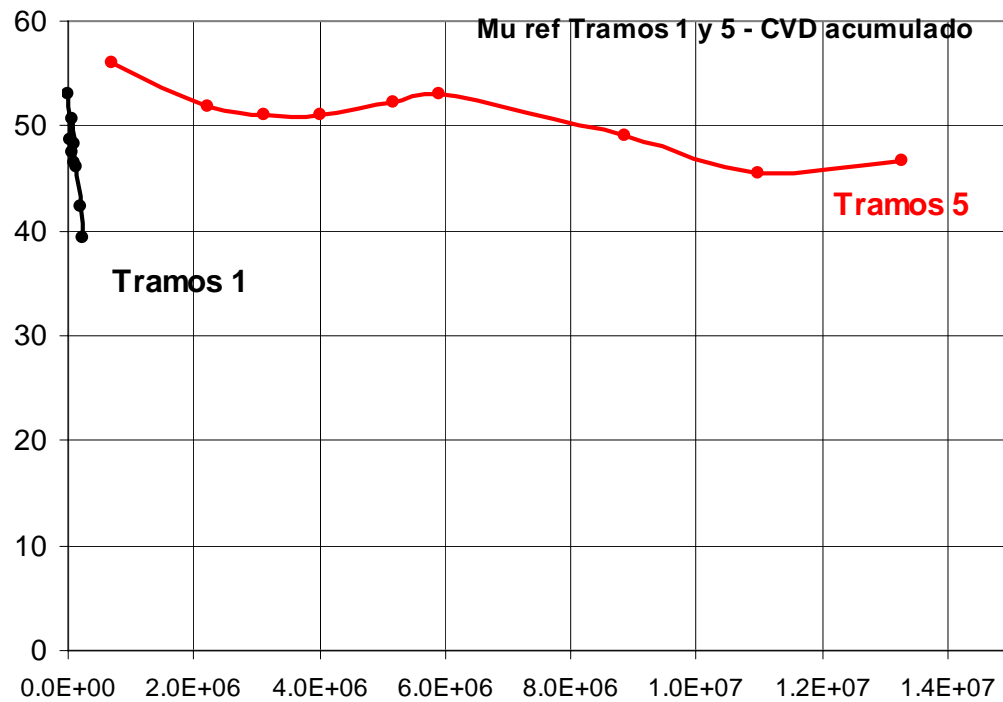


Figura 4.30. Variación del Mu Ref con el TMDA acumulado

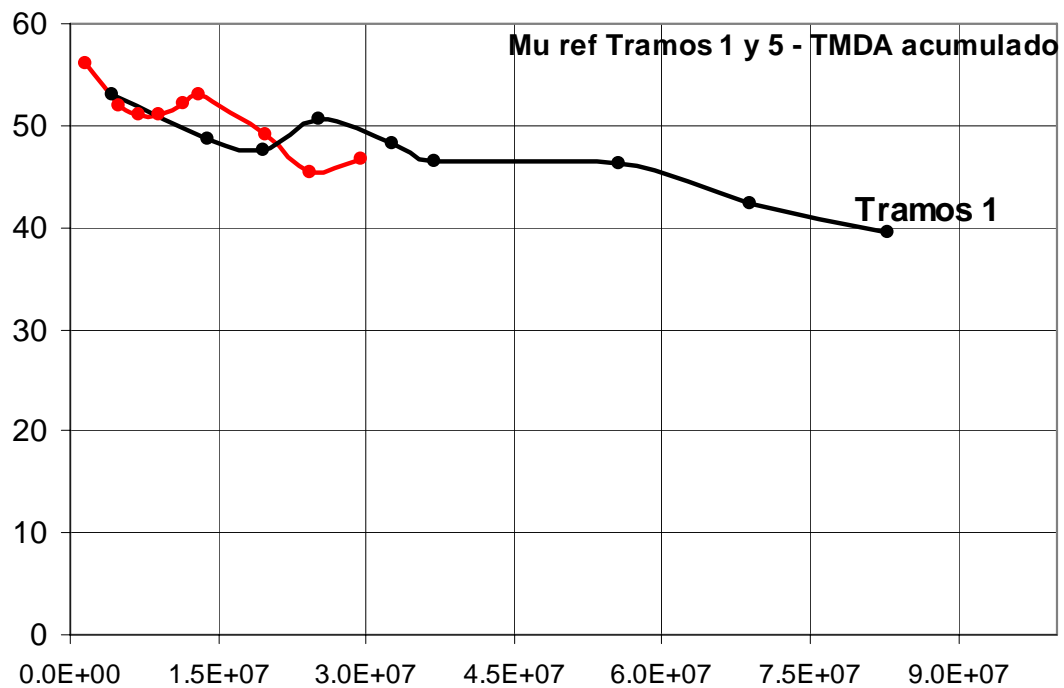


Figura 4.31. Variación del Mu Ref con el tránsito pesado acumulado



Este parámetro, a pesar de haber sido calculado tomando el F60 como punto de paso, tiene una variación semejante al coeficiente de fricción BPN. Presentando pérdidas semejantes en ambos tramos, sin poner de manifiesto la mayor variación en HS que poseen los tramos 5.

Como fue indicado previamente, esto puede estar motivado porque el valor de macrotextura se mantiene por encima de 0.5 mm, valor que todavía permite que el agua existente sobre la superficie se “esconda” en la macrotextura superficial y no implique una mayor variación en el coeficiente de fricción (aspecto de gran peso en las mediciones con equipos mu meter, donde el agua de riego es importante, con un espesor de 1 mm).

#### 4.3.6. Desarrollo de modelos de evolución

En base a los resultados de mediciones obtenidos en estos tramos, se han desarrollado modelos que permiten predecir cual será la evolución de los mismos a partir de valores conocidos desde su construcción.

Se aclara que los mismos tienen validez para las condiciones vigentes en los tramos donde se realizó la experiencia, los cuales son:

- Superficie limpia de suciedad, los tramos se encuentran ubicados en autopista sin presencia de accesos laterales y con banquetas pavimentadas.
- Clima moderado, temperatura moderada, lluvia abundante y sin nieve.

##### 4.3.6.1. Modelo de macrotextura

El modelo de evolución de la macrotextura planteado tiene la forma:



$$HS = HS_{ini} + a * edad * LOG10(CVD_{ini}) + b * (edad * CVD_{ini} * r)^c$$

Donde:

HS	macrotextura a una determinada edad en servicio (mm)
HS <sub>ini</sub>	valor inicial de macrotextura, medido con Círculo de Arena (mm)
CVD <sub>ini</sub>	cantidad de vehículos pesados inicial, por día
edad	edad en servicio, en días
r	tasa de crecimiento del tránsito
a, b y c	coeficientes de ajuste

Los coeficientes a, b y c fueron determinados de manera de reducir el error cuadrático medio de la ecuación adoptada. Ese error fue minimizado para ambos tramos en forma conjunta.

El error cuadrático medio de este modelo, calculado en base a los resultados obtenidos en los tramos 1 y 5, es de 0.07 mm, y el coeficiente de determinación  $R^2$  es 0.85. El modelo final es:

$$HS = HS_{ini} - 3.1 * 10^{-6} * edad * LOG10(CVD_{ini}) - 0.00265 * (edad * CVD_{ini} * r)^{0.432}$$

En la Figura 4.32 se observan como punto los resultados de las mediciones de campaña, y en línea la predicción realizada utilizando el modelo desarrollado. Un único modelo para ambos tramos, calculado con las condiciones iniciales de cada tramo.

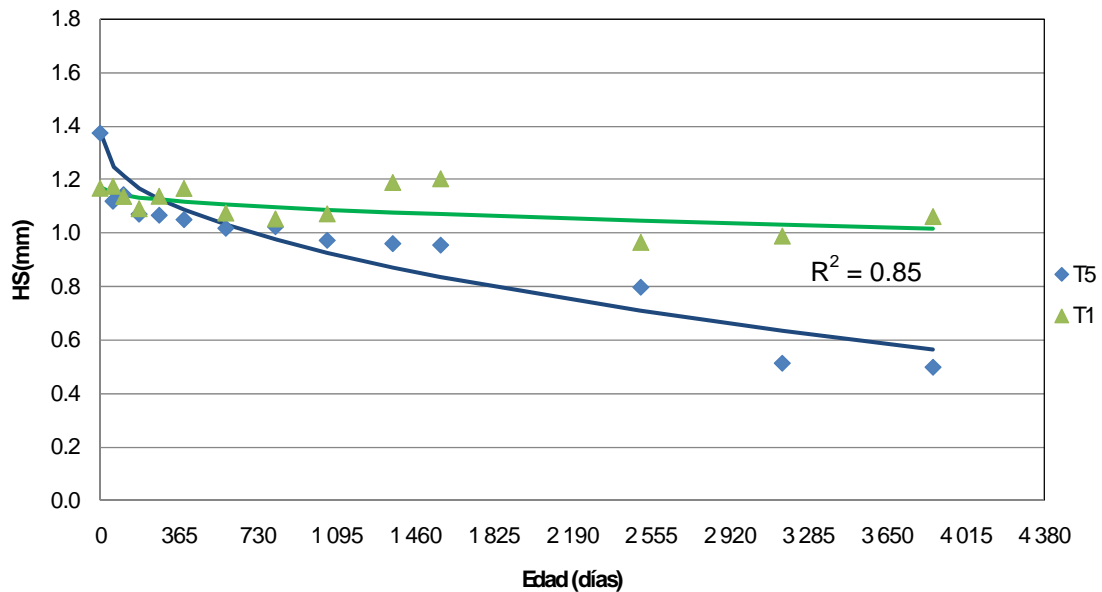


Figura 4.32. Mediciones de macrotextura y predicción del modelo

En las Figuras siguientes se muestra la sensibilidad del modelo obtenido, para distintas tasas de crecimiento del tránsito y para distintas intensidades de tránsito identificados por el número de vehículos pesados por día.

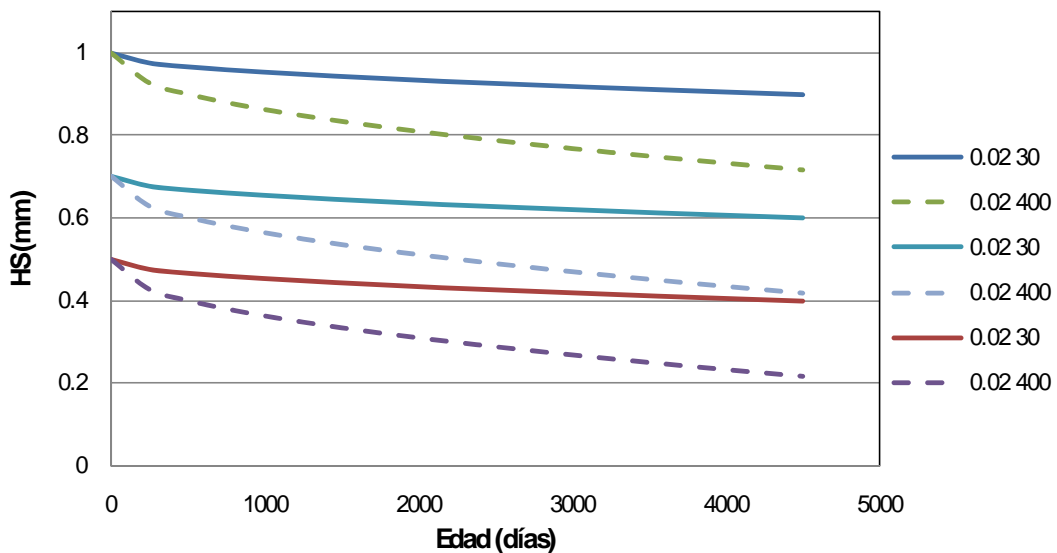


Figura 4.33. Evolución para una tasa de crecimiento de 2 %, dos intensidades de vehículos pesados por día, y tres valores iniciales de macrotextura

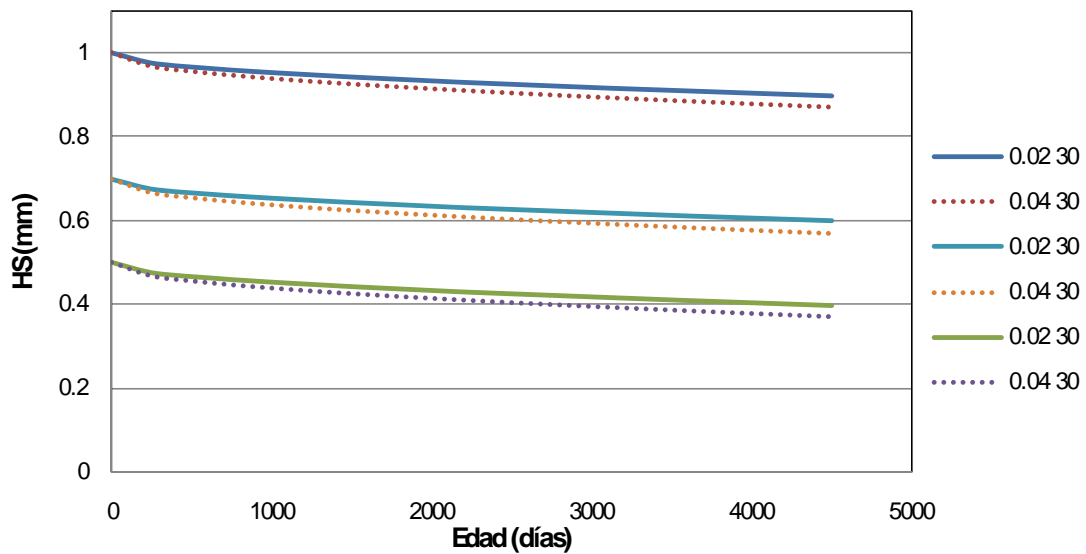


Figura 4.34. Evolución para dos tasas de crecimiento, 2 % y 4%, 30 vehículos pesados por día, y tres valores iniciales de macrotextura

El modelo presenta sensibilidad frente a los parámetros, indicando mayor decrecimiento de la macrotextura cuando se incrementa la tasa de crecimiento y cuando se incrementa la cantidad de vehículos pesados.

En base a este modelo desarrollado puede analizarse, por ejemplo, la duración en años que tendría una carpeta antes de alcanzar un valor mínimo de macrotextura de 0.4 mm, partiendo de distintos valores de macrotextura inicial y con distintas intensidades de tránsito pesado. En la Figura 4.35 se observan los resultados de vidas esperadas para superficies con distintas macrotexturas iniciales, para dos tasas de crecimiento del tránsito de 0.02 y 0.04, y tres intensidades de tránsito pesado de 30, 400 y 3000 vehículos pesados por día. Donde se observa, por ejemplo, que para una superficie con macrotextura inicial de 0.6 mm pueden pasar 4 años para arribar a una macrotextura de 0.4 mm con un tránsito de 400 vehículos pesados por día y una tasa de crecimiento de 4%; mientras que si solo es solicitada por 30 vehículos pesados por día ese tiempo es superior a 20 años, independientemente de la tasa de crecimiento del tránsito.

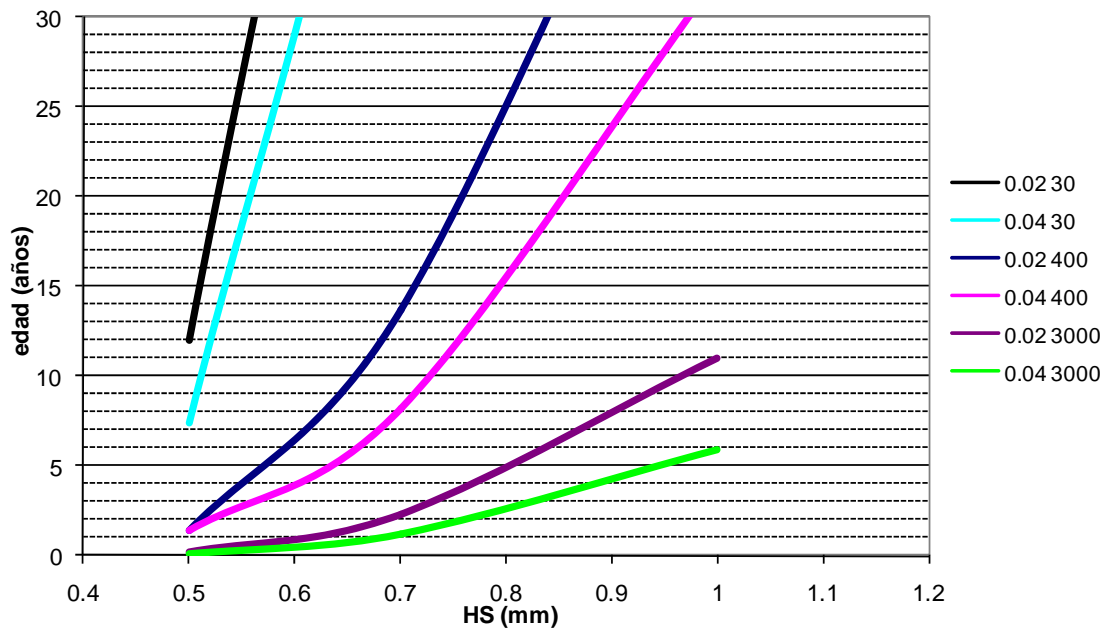


Figura 4.35. Duración en años antes de alcanzar una macrotextura de 0.4 mm

#### 4.3.6.2. Modelo de coeficiente de fricción

El modelo planteado para valorar la evolución del coeficiente de fricción es:

$$\text{BPN} = \text{CPA} * d + e * (\text{TMDA}_{\text{ini}} * (1+r)^{(\text{edad}/365)})^f * \text{edad}^g$$

Donde:

BPN valor de Péndulo de Fricción a una determinada edad en servicio

CPA coeficiente de pulimento acelerado del agregado grueso

TMDA<sub>ini</sub> Tránsito medio diario anual inicial

Edad edad en servicio, en días

r tasa de crecimiento del tránsito

d, e, f y g coeficientes de ajuste

Los coeficientes d, e, f y g fueron determinados de manera de reducir el error cuadrático medio de la ecuación adoptada. Ese error fue minimizado para ambos tramos en forma conjunta.



El error cuadrático medio de este modelo, calculado en base a los resultados obtenidos en los tramos 1 y 5, es de 1.4 BPN, y el coeficiente de determinación  $R^2$  es 0.88. El modelo final es:

$$\text{BPN} = \text{CPA} * 1.53 - 0.00470 * (\text{TMDA}_{\text{ini}} * (1 * r)^{(\text{edad}/365)})^{0.46} * \text{edad}^{0.407}$$

En la Figura 4.36 se observan como punto los resultados de las mediciones de campaña, y en línea la predicción realizada utilizando el modelo desarrollado. Un único modelo para ambos tramos, calculado con las condiciones iniciales de cada tramo.

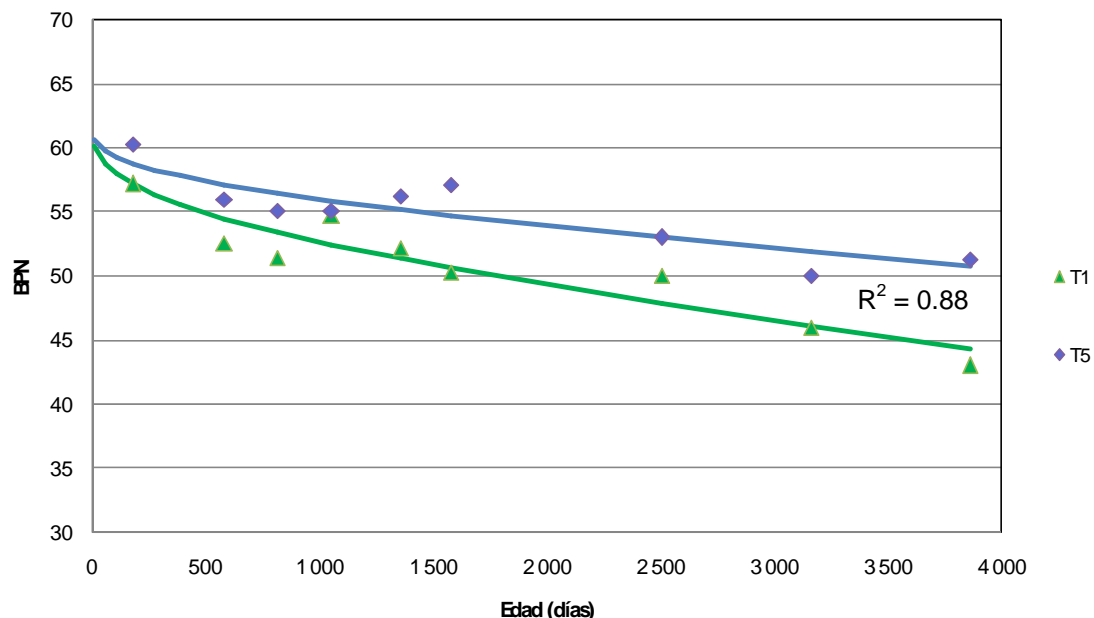


Figura 4.36. Mediciones de coeficiente de fricción y predicción del modelo

El valor inicial a partir del cual comienza a decrecer el coeficiente de fricción depende directamente del coeficiente de pulimento acelerado CPA de los agregados. El factor obtenido en el modelo que acompaña al CPA, representa que la ruta comienza su vida en servicio con un agregado “virgen” solo deteriorado por el proceso de elaboración de la mezcla, el que posee un valor de microtextura superficial 1.53 veces el valor de CPA obtenido en el ensayo.

En la Figura 4.37 se muestra la sensibilidad del modelo obtenido, para distintas tasas de crecimiento del tránsito (0.02 y 0.06), para distintas intensidades de tránsito identificados por el  $TMDA_{ini}$  (10000 – 30000), y distintos pulimentos CPA de agregado pétreo (40 – 55).

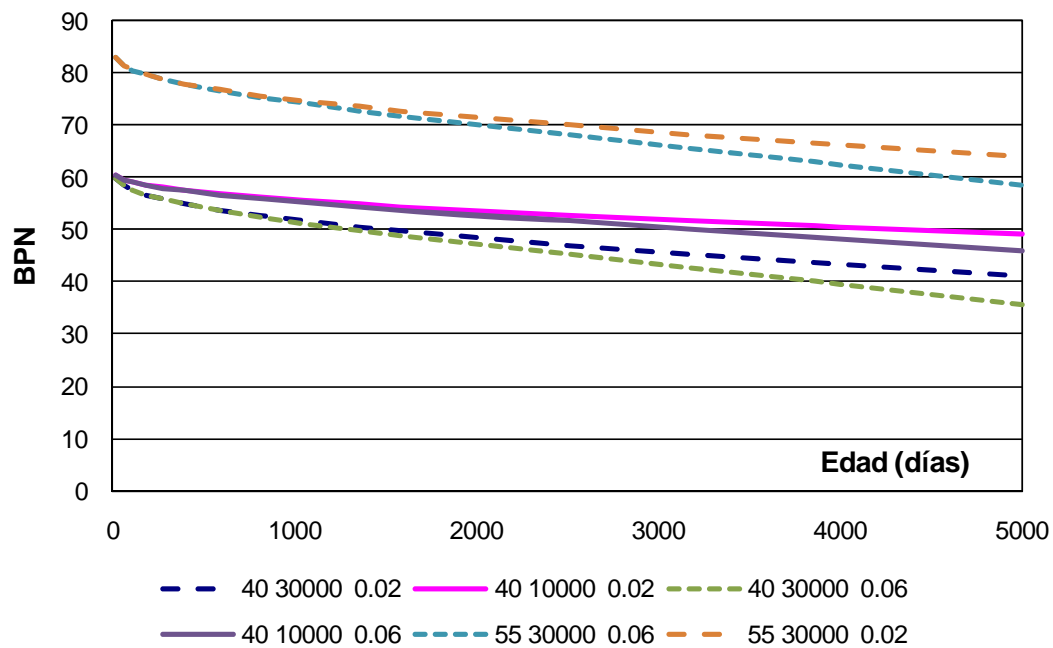


Figura 4.37. Sensibilidad del modelo de evolución del coeficiente de fricción

#### 4.3.6.3. Modelo de F60

Respecto al parámetro F60 no se desarrolló ningún modelo en particular, lo que se hizo fue calcular la macrotextura y el coeficiente de fricción con los modelos indicados previamente y luego, en base a esos resultados se calculó el F60 que se informaría. Los resultados obtenidos se muestran en forma gráfica en la Figura 4.38, donde los puntos son los valores obtenidos a partir de las mediciones de campaña, y las líneas los valores obtenidos calculados de los resultados de los modelos de macrotextura y coeficiente de fricción.

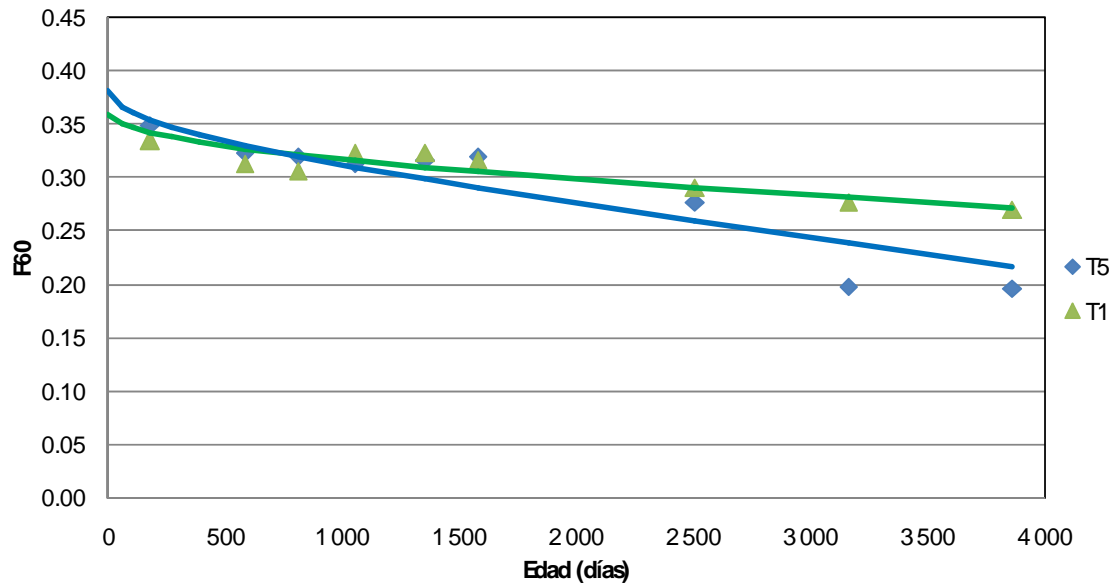


Figura 4.38. Evolución del F60 calculado a partir de los modelos de macrotextura y coeficiente de fricción

Esta evolución de F60 obtenida a partir de la aplicación de los modelos previos se considera aceptable, ya que la tendencia acompaña los puntos calculados a partir de los resultados de campaña.



## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

#### **5.1.1. Mediciones en Virginia Smart Road**

Se ha obtenido la sensibilidad de los parámetros coeficiente de fricción medido con dos tipos de equipamiento, y del F60, con respecto a la temperatura, para los tramos con superficie asfáltica, mostrados en la Tabla 4.1. Según se indica, los resultados de coeficiente de fricción obtenidos con el Trailer de rueda bloqueada se encuentran menos influenciados por la temperatura que los obtenidos con el DFTester, los coeficientes son la mitad de sensibles.

La diferencia en las influencias obtenidas para los resultados de coeficiente de fricción de los equipos y para el F60 se ve magnificada por el hecho de las diferentes escalas de medición. Para los equipos las escalas están consideradas de 0 a 100, mientras que para el F60 de 0 a 1. Si los resultados de los equipos se expresan en escala de 0 a 1, las influencias son 0.0013 para el Trailer rueda bloqueada a 64 Km/h, y 0.0032 para el DFTester a 20 Km/h.

#### **5.1.2. Mediciones en Aeropuerto**

Se refuerza la validez de la aplicabilidad de la escala de corrección de los resultados de coeficiente de fricción con la temperatura del agua remanente en superficie, siendo esta de 1 punto de BPN cada 3 °C.

Respecto al parámetro F60, se obtuvo una influencia de 1 punto de F60 cada 500 °C, ó 0.01 punto de F60 cada 5 °C.

Estos resultados obtenidos con el Péndulo de Fricción son similares a los obtenidos con el equipo DFTester a 20 Km/h.



### 5.1.3. Mediciones en Autopista con tránsito elevado

En el análisis de los resultados obtenidos en estos tramos se han obtenidos varias conclusiones:

- La pérdida de macrotextura está fundamentalmente condicionada a la presencia de vehículos pesados, mientras que la disminución del coeficiente de fricción está relacionada con el volumen de tránsito TMDA. Esto confirma lo indicado en las referencias bibliográficas, como ser en los modelos de evolución incorporados en el HDM 4.
- Respecto al valor mínimo de coeficiente de fricción calculado con el modelo propuesto por el TRRL, el mismo todavía no se ha alcanzado. Puede inferirse que este comportamiento se debe a:
  - La macrotextura se mantiene en valores superiores a 0.5 mm, y por lo tanto su influencia en la disminución del coeficiente de fricción por el momento no es importante.
  - los agregados no han sufrido aún el desgaste predicho en el ensayo de pulimento acelerado. O sea que las condiciones de servicio (lluvia y presencia de suciedad) existentes en las calzadas de la autopista son menos exigentes que las planteadas en el ensayo de los agregados, y por lo tanto en los 11 años de servicio no han alcanzado el valor mínimo predicho.
- Se han desarrollado modelos de predicción de la macrotextura medida con Círculo de Arena y del coeficiente de fricción medido con el Péndulo de Fricción TRRL. Se aclara que los mismos tienen validez para las condiciones vigentes en los tramos donde se realizó la experiencia, los cuales son: superficie limpia de suciedad, los tramos se encuentran ubicados en autopista sin presencia de accesos laterales y con banquetas



pavimentadas; y clima moderado, temperatura moderada, lluvia abundante y sin nieve.

El modelo de evolución de la macrotextura obtenido es:

$$HS = HS_{ini} - 3.1 * 10^{-6} * edad * LOG10(CVD_{ini}) - 0.00265 * (edad * CVD_{ini} * r)^{0.432}$$

Donde:

HS	macrotextura a una determinada edad en servicio (mm)
HS <sub>ini</sub>	valor inicial de macrotextura, medido con Círculo de Arena (mm)
CVD <sub>ini</sub>	cantidad de vehículos pesados inicial, por día
edad	edad en servicio, en días
r	tasa de crecimiento del tránsito

El modelo de evolución del coeficiente de fricción obtenido es:

$$BPN = CPA * 1.53 - 0.00470 * (TMDA_{ini} * (1 * r)^{(edad/365)})^{0.46} * edad^{0.407}$$

Donde:

BPN	valor de Péndulo de Fricción a una determinada edad en servicio
CPA	coeficiente de pulimento acelerado del agregado grueso
TMDA <sub>ini</sub>	Tránsito medio diario anual inicial
Edad	edad en servicio, en días
r	tasa de crecimiento del tránsito

Para el parámetro F60 no se ha desarrollado un modelo particular, y el mismo puede ser calculado luego de la aplicación de los modelos para los dos parámetros que lo componen.



## 5.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta las limitaciones del presente trabajo, se proponen las siguientes líneas de investigación para continuar y reforzar las conclusiones obtenidas, las mismas son dirigidas fundamentalmente al análisis de los comportamientos en rutas de Argentina, de carpetas de rodamiento construidas con agregados locales y sometidas al tránsito y condiciones climatológicas de distintas regiones del país:

- Extender el estudio a otros tipos de superficie de rodamiento, para ello es necesario realizar el seguimiento en tramos con carpetas de rodamiento distintas a la mezcla tipo F10.
- Extender el estudio a rutas con otros tipos de tránsito, volumen y composición.
- Desarrollar modelos de predicción en base a resultados obtenidos con otros tipos de equipos de medición del coeficiente de fricción y de la macrotextura, fundamentalmente equipos de medición continua en uso en Argentina, como Scrim Tex y Mu Meter.
- Validar los modelos obtenidos en carpetas de rodamiento con mezclas asfálticas construidas con agregados pétreos provenientes de canteras de otras zonas geográficas y de distinta naturaleza mineralógica.
- Analizar la variación estacional en los resultados de coeficiente de fricción y macrotextura valorados con otros equipos en uso en Argentina.



- Analizar el comportamiento desde la construcción y durante el primer año de servicio, a fin de valorar la influencia que el recubrimiento de material asfáltico tiene sobre los resultados de coeficiente de fricción.





## **CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] LCPC, 1993. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 185, especial adherencia, completo.
  
- [2] Del Val M.A. 2010. ASEFMA. Asociación de Fabricantes de Mezclas Asfálticas de España. Monografía 11. La resistencia al deslizamiento de los pavimentos.
  
- [3] Hosking, R. 1992. "Road aggregates and skidding". Publicación del Transport Research Laboratory. London, England. ISBN 0115511156.
  
- [4] AIPCR, Comité técnico características de superficie C1 de la Asociación Mundial de la Carretera, 1987. XVIII Congreso Mundial de Carreteras, Bruselas.
  
- [5] LCPC, 2005. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 255, especial adherencia, completo.
  
- [6] AIPCR, Comité técnico características de superficie C1 de la Asociación Mundial de la Carretera, 1995. Experimento internacional AIPCR de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento. Publicación AIPCR 01.01.T. París, Francia.
  
- [7] Norma ASTM E 1960, 2002. Standard practice for calculation International Friction Index of a pavement surface. American Society for testing and Materials.
  
- [8] Echaveguren, T., 2008. Modelación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos. Tesis Doctorado. Pontificia Universidad Católica de Chile.



- [9] Gimenez Guspi, L, 2002. Modelos de comportamiento de adherencia neumático calzada. Trabajo Final Carrera Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Rosario.
  
- [10] Brillet y Gothié, 1983. Variations saisonnières de l'adhérence des chaussées mesurée par l'appareil scrim. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 127.
  
- [11] AASHTO Technical Committee on Pavements. Guide for Pavement Friction. 2008. American Association of State Highways and Transportation Officials. ISBN 978-1-56051-428-2.
  
- [12] HD 28/04, 2004. Design manual for roads and bridges. Skid resistance. The Highway Agency.
  
- [13] TYROSAFE Proyect. 2010. Deliverable D16. Report on possible impact of climatic change on road surfaces and tyres with regard to skid resistance, rolling resistance and noise emission. <http://tyrosafe.fehrl.org>.
  
- [14] TYROSAFE Proyect. 2010. Deliverable D12. Report future research areas for environmental effects. <http://tyrosafe.fehrl.org>.
  
- [15] HDM 4. 2000. The Highway Development and Management Series. Volumen 4. Part C. Road Deterioration Models. AIPCR. Asociación Mundial de la Ruta. ISBN 2-84060-059-5.
  
- [16] Roe-SA Hartshorne. 1994. "The Polished Stone Value of aggregates and in-service skidding resistance". Transport Research Laboratory. Report n° 322.



- [17] Szatkowski, W, and Hosking, J, 1972. The effect of traffic and aggregate on the skidding resistance of bituminous surfaces. TRRL Laboratory Report LR 504.
- [18] Lorino, T. Pavement surface characteristics evolution. Surf 2008. 6<sup>th</sup> Symposium on pavement surface characteristics. Slovenia.
- [19] Jayawickrama, P. and Thomas B. 1998. Correction of field skid measurements for seasonal variations in Texas. Transportation Research Record n° 1639. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Estados Unidos.
- [20] Pavement Friction Measurement Normalized for Operational, Seasonal, and Weather Effects. Federal Highway Administration. Publication N° FHWA-RD-88-069. 1989.
- [21] Rodriguez, O. 2009. Evaluation of pavement surface friction seasonal variations. Tesis Master of Science. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [22] NCHRP, 2000. Evaluation of pavement friction characteristics. A syntesis of highway practices. Syntesis 291. Transportation Research Board. Estados Unidos.
- [23] Gothie, M, 2005. Skid resistance measurements of pavements and their interpretation in France. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n° 255.
- [24] SKIDSAFE Proyect. 2010. Enhanced driver safety due to improve skid resistance. [www.skidsafe.org](http://www.skidsafe.org).



- [25] Pagola, M. 2002. La situación de la Argentina respecto a la valoración de la adherencia neumático-pavimento. Jornadas Técnicas de Actualización organizadas por la Comisión Permanente del Asfalto. Revista "El Asfalto", Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto, nº 95.
- [26] Pagola, M., Giovanon, O., Rodríguez, P. y Mazzitelli, D. 2006. "Calibración a "IFI" de los equipos para medir la adherencia neumático calzada de la Dirección Nacional de Vialidad". XXXIV Reunión del Asfalto, Mar del Plata, Argentina.
- [27] Pagola, M., Giovanon, O., Rodríguez, P., Mazzitelli, D. y colaboradores. 2008. "Actualización de las metodologías de medición y programas de adquisición de datos de los equipos de la Dirección Nacional de Vialidad". XXXV Reunión del Asfalto, Argentina.
- [28] Poncino, H. 2002. "Adherencia neumático-pavimento. Conceptos generales. Estado del conocimiento". Jornadas técnicas de actualización organizadas por la Comisión Permanente del Asfalto. Revista "El Asfalto", Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto, nº 95.
- [29] Roa, J. 2008. Evaluation of International Friction Index and high-friction surfaces. Tesis Master of Science. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [30] Cattaneo, F. y Páramo, J., 2005. "Comportamiento en servicio de microconcreto asfáltico discontinuo en caliente en el Acceso Norte a Buenos Aires" 13º Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto San José - Costa Rica.
- [31] Luna Blanco, S., Pagola, M., Díaz Molina, F. y Benzaquen, M. 2001. "Ensayos cruzados sobre el Coeficiente de Pulido Acelerado". 11º Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Lima, Perú.



- [32] Pagola, M., Andreoni, R., Poncino, H. et al. 2003. "Caracterización de agregados pétreos procedentes de distintas regiones de Argentina". XII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Quito, Ecuador.
- [33] Pagola, M. y Giovanon, O. 2011. "Analysis of temperature influence on skid results". 3rd International Surface Friction Conference, Safer Road Surfaces – Saving Lives, Gold Coast, Australia.
- [34] Esteban, D., Páramo, J., Pagola, M., Vilicich, G. y Represas, A. 2011. "Evolución del comportamiento de carpeta de rodamiento tipo F10 en 11 años de servicio bajo tránsito en autopista". XVI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil.

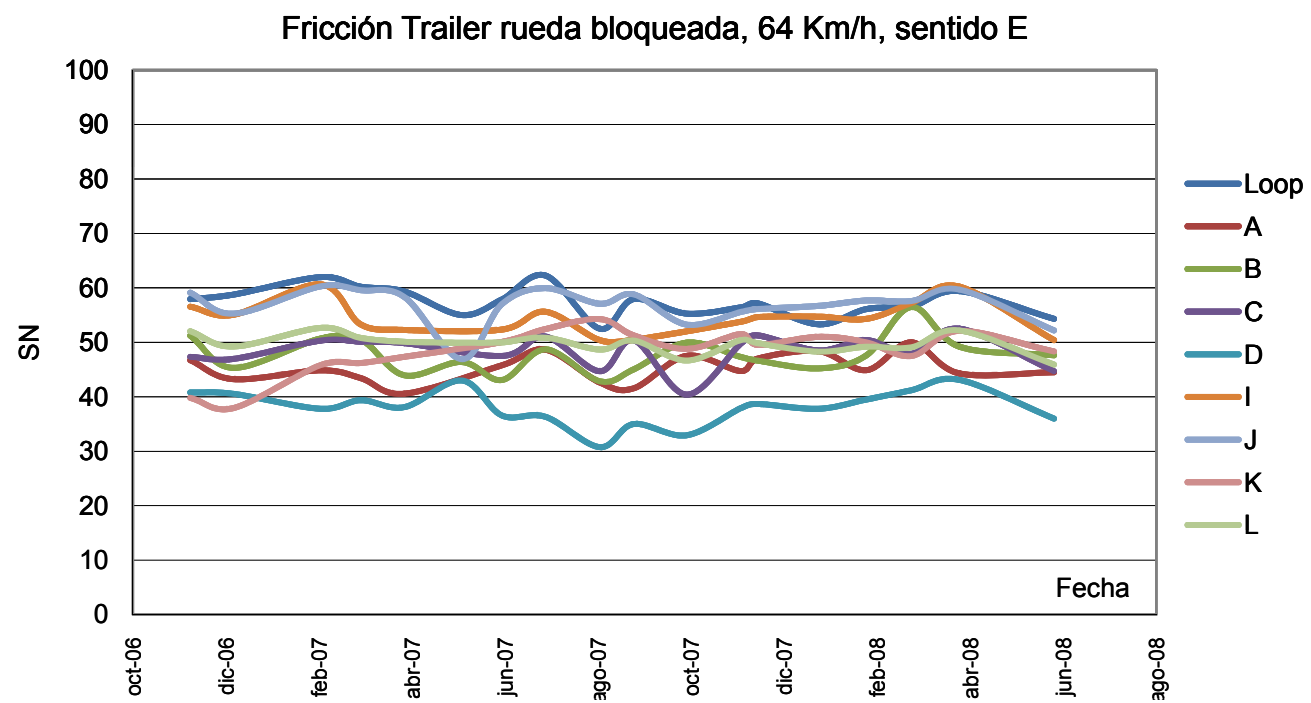
# ANEXO

# MEDICIONES EN PISTA VIRGINIA SMART ROAD

MEDICIONES TRAILER RUEDA BLOQUEADA - 64 Km/h - sentido E

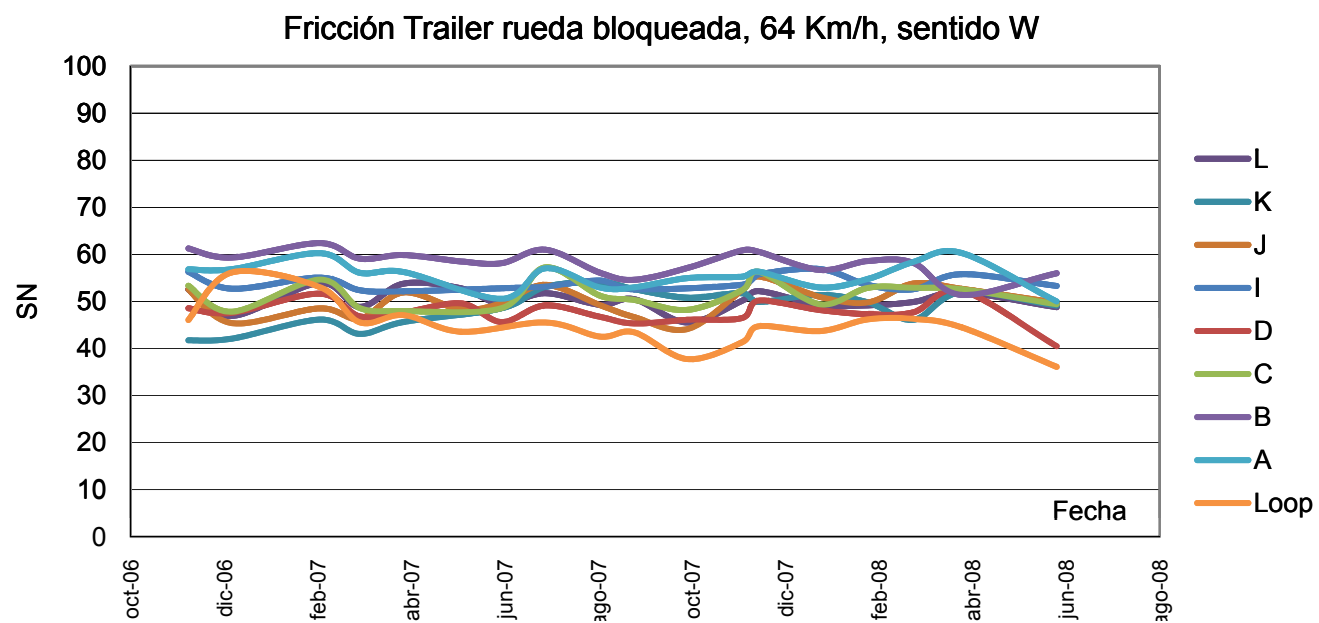
	6/12/06	3/1/07	28/2/07	26/3/07	23/4/07	30/5/07	25/6/07	23/7/07	27/8/07	18/9/07	22/10/07	26/11/07	7/12/07	15/1/08	15/2/08	15/3/08	15/4/08	15/6/08
Loop	57.9	58.8	62.0	60.2	59.3	55.0	57.9	62.3	52.5	57.9	55.3	56.4	57.1	53.3	56.1	56.6	59.4	54.3
A	46.7	43.2	44.9	43.4	40.6		45.8	48.7	42.6	41.6	47.5	44.7	47.0	48.4	44.9	50	44.3	44.5
B	51.2	45.3	50.7	50.5	43.9	46.4	43.1	48.7	42.8	45.0	49.9	47.3	46.6	45.2	47.6	56.5	49.2	47.6
C	47.3	47.0	50.3	50.1	49.9		47.5	51.1	44.7	50.4	40.4	49.8	51.3	48.5	50.4	47.9	52.5	44.7
D	40.8	40.5	37.8	39.4	38.1	43.0	36.6	36.3	30.8	35.0	32.9	37.9	38.7	37.8	39.5	41.2	43.1	36
I	56.5	55.1	60.6	53.3	52.3		52.3	55.6	50.4	50.5		53.8	54.6	54.7	54.3	57.2	60.2	50.4
J	59.1	55.3	60.3	59.6	58.4	46.9	57.1	60.0	57.1	58.8	53.3	55.6	56.1	56.7	57.7	57.6	59.7	52.2
K	39.8	37.9	45.8	46.2	47.3		50.1	52.4	54.3	51.3	48.8	51.5	49.5	51	50	47.5	52.1	48.3
L	52.0	49.2	52.7	50.8	50.1	49.9	50.0	50.9	48.7	50.3	46.7	50.4	49.8	48.3	49.2	49.1	52.2	45.9





MEDICIONES TRAILER RUEDA BLOQUEADA - 64 Km/h - sentido W

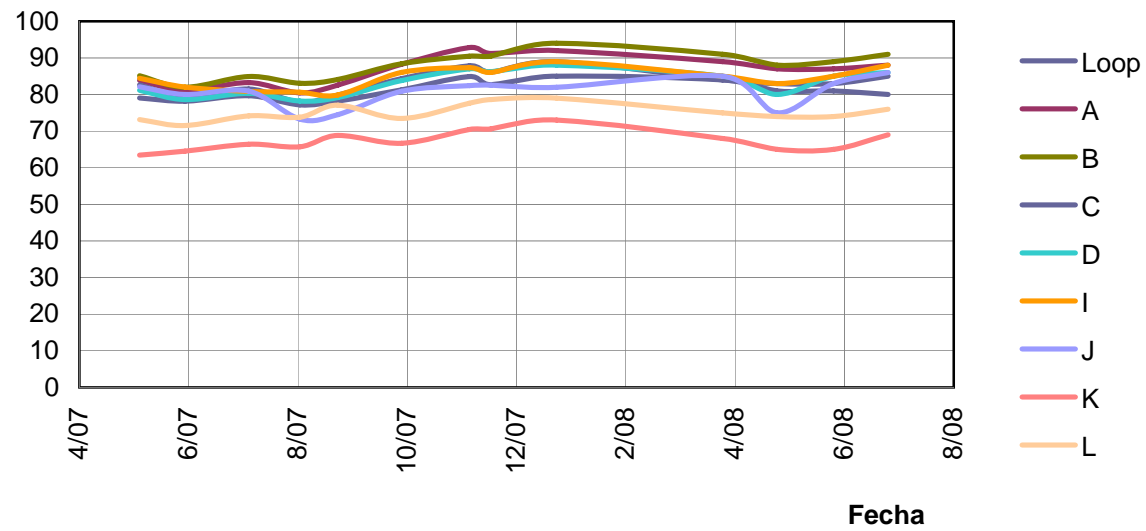
	6/12/06	3/1/07	28/2/07	26/3/07	23/4/07	30/5/07	25/6/07	23/7/07	27/8/07	18/9/07	22/10/07	26/11/07	7/12/07	15/1/08	15/2/08	15/3/08	15/4/08	15/6/08
L	52.6	46.9	54.0	48.9	53.8	52.8	49.5	51.8	49.3	50.5	41.9	50.1	52.2	49.3	49.2	49.9	51.9	48.8
K	41.7	42.1	46.1	43.1	45.6		48.6	53.1	54.1	52.6	45.3	51.8	49.9	51.4	49.8	46.1	52.0	49.1
J	52.6	45.4	48.5	46.3	51.9	48.3	49.7	53.5	49.2	46.7	47.5	52.4	55.3	51.0	49.8	53.8	52.7	49.7
I	56.3	52.7	55.1	52.4	52.1		35.2	53.2	54.4	52.6		53.5	55.7	56.9	53.5	52.6	55.8	53.3
D	48.6	47.6	51.7	46.8	47.7	49.6	45.6	49.2	46.7	45.3	35.4	46.5	50.2	48.2	47.3	47.7	52.3	40.5
C	53.3	47.8	54.6	48.6	48.0		48.6	57.2	51.2	50.3	38.0	52.4	56.3	49.4	52.9	52.9	52.6	49.4
B	61.3	59.3	62.4	59.1	59.9	58.5	58.1	61.0	56.1	54.6	44.5	60.8	60.5	56.7	58.6	58.2	51.4	56.0
A	56.8	56.9	60.3	56.1	56.3		50.6	57.1	53.0	53.0	46.3	55.3	56.3	53.0	54.8	58.4	60.3	50.0
Loop	46.1	56.2	53.1	45.6	47.1	43.6		45.5	42.5	43.4	29.1	41.3	44.7	43.7	46.2	46.3	44.5	36.1



**FRICCION DFTester a 20 Km/h Sentido E**

	May-07	Jun-07	Jul-07	Ago-07	Sep-07	Oct-07	Nov-07	Dic-07	Ene-08	Abr-08	May-08	Jun-08	Jul-08
Loop	0.79	0.78	0.80	0.77	0.78	0.81	0.85	0.83	0.85	0.84	0.81	0.81	0.80
A	0.84	0.81	0.83	0.80	0.83	0.88	0.93	0.91	0.92	0.89	0.87	0.87	0.88
B	0.85	0.82	0.85	0.83	0.84	0.88	0.90	0.91	0.94	0.91	0.88	0.89	0.91
C	0.83	0.79	0.82	0.78	0.80	0.84	0.88	0.86	0.89	0.84	0.83	0.83	0.85
D	0.81	0.79	0.80	0.78	0.79	0.84	0.87	0.86	0.88	0.85	0.80	0.85	0.86
I	0.84	0.82	0.81	0.81	0.80	0.86	0.87	0.86	0.89	0.85	0.83	0.85	0.88
J	0.82	0.80	0.81	0.73	0.75	0.81	0.82	0.83	0.82	0.85	0.75	0.83	0.86
K	0.63	0.65	0.66	0.66	0.69	0.67	0.70	0.71	0.73	0.68	0.65	0.65	0.69
L	0.73	0.72	0.74	0.74	0.77	0.73	0.78	0.79	0.79	0.75	0.74	0.74	0.76

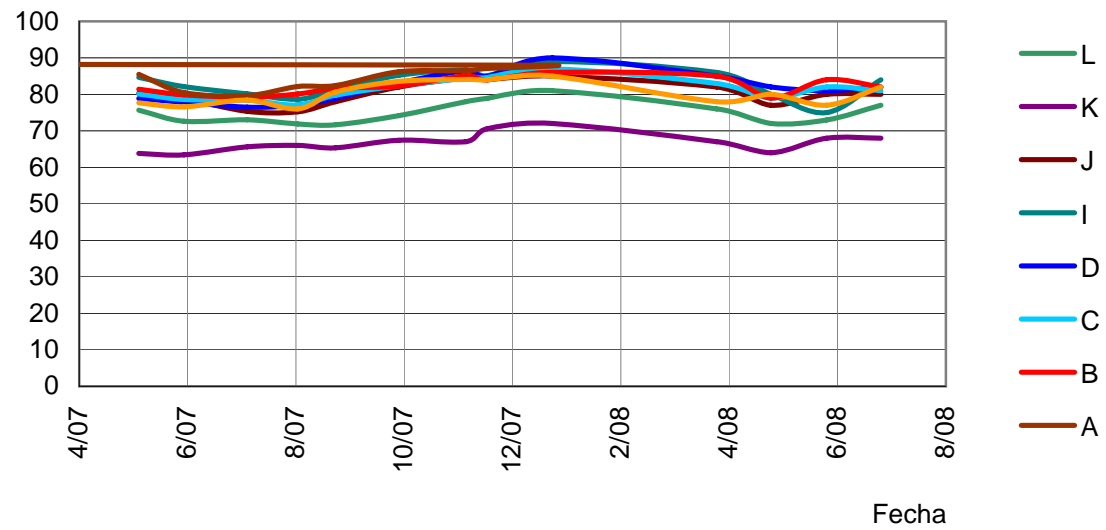
**DFTester a 20 Km/h, secciones E**



**FRICCION DFTester a 20 Km/h Sentido W**

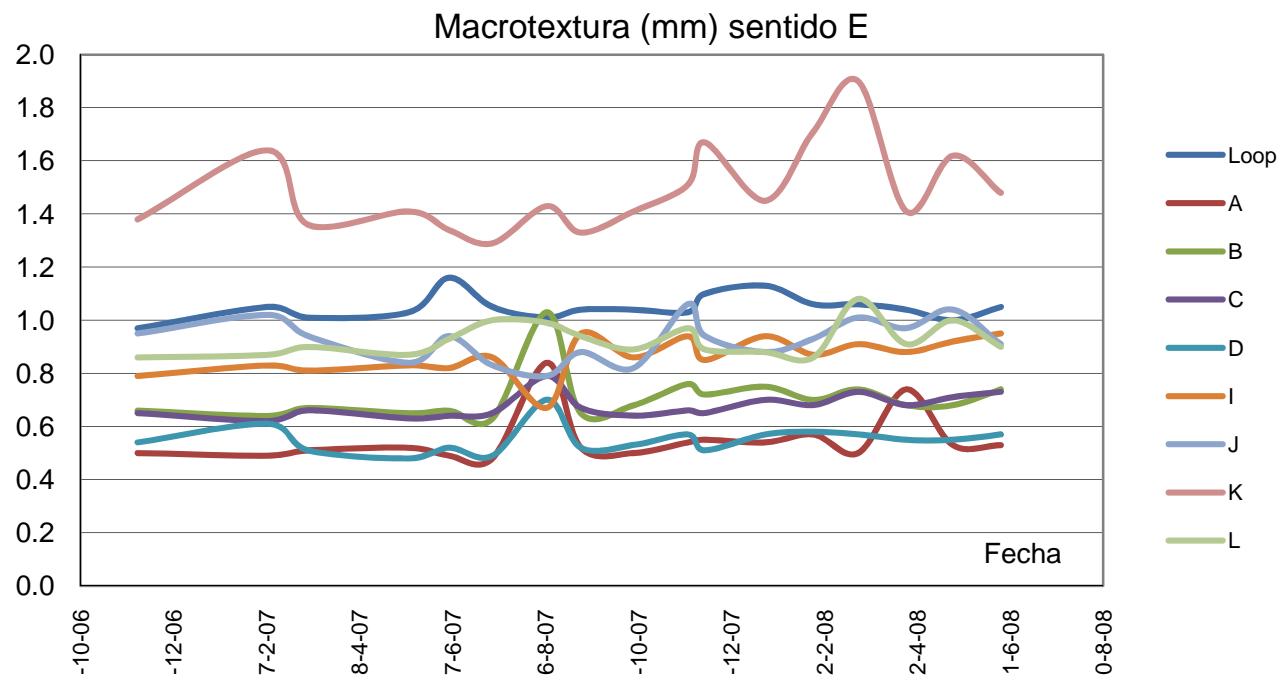
	May-07	Jun-07	Jul-07	Ago-07	Sep-07	Oct-07	Nov-07	Dic-07	Ene-08	Abr-08	May-08	Jun-08	Jul-08
L	0.76	0.73	0.73	0.72	0.72	0.74	0.78	0.79	0.81	0.76	0.72	0.73	0.77
K	0.64	0.63	0.66	0.66	0.65	0.67	0.67	0.71	0.72	0.67	0.64	0.68	0.68
J	0.80	0.79	0.75	0.75	0.78	0.82	0.84	0.84	0.85	0.82	0.77	0.80	0.80
I	0.85	0.82	0.80	0.79	0.81	0.85	0.87	0.85	0.89	0.86	0.80	0.75	0.84
D	0.79	0.78	0.77	0.77	0.79	0.83	0.86	0.85	0.90	0.85	0.82	0.81	0.82
C	0.80	0.79	0.78	0.77	0.80	0.82	0.84	0.85	0.87	0.83	0.79	0.82	0.81
B	0.81	0.80	0.79	0.80	0.82	0.82	0.85	0.84	0.86	0.85	0.79	0.84	0.82
A	0.85	0.81	0.80	0.82	0.82	0.86	0.86	0.87	0.88	0.89	0.81	0.84	0.83
Loop	0.78	0.77	0.78	0.76	0.81	0.84	0.84	0.84	0.85	0.78	0.80	0.77	0.82

**DFTester a 20 Km/h, secciones W**

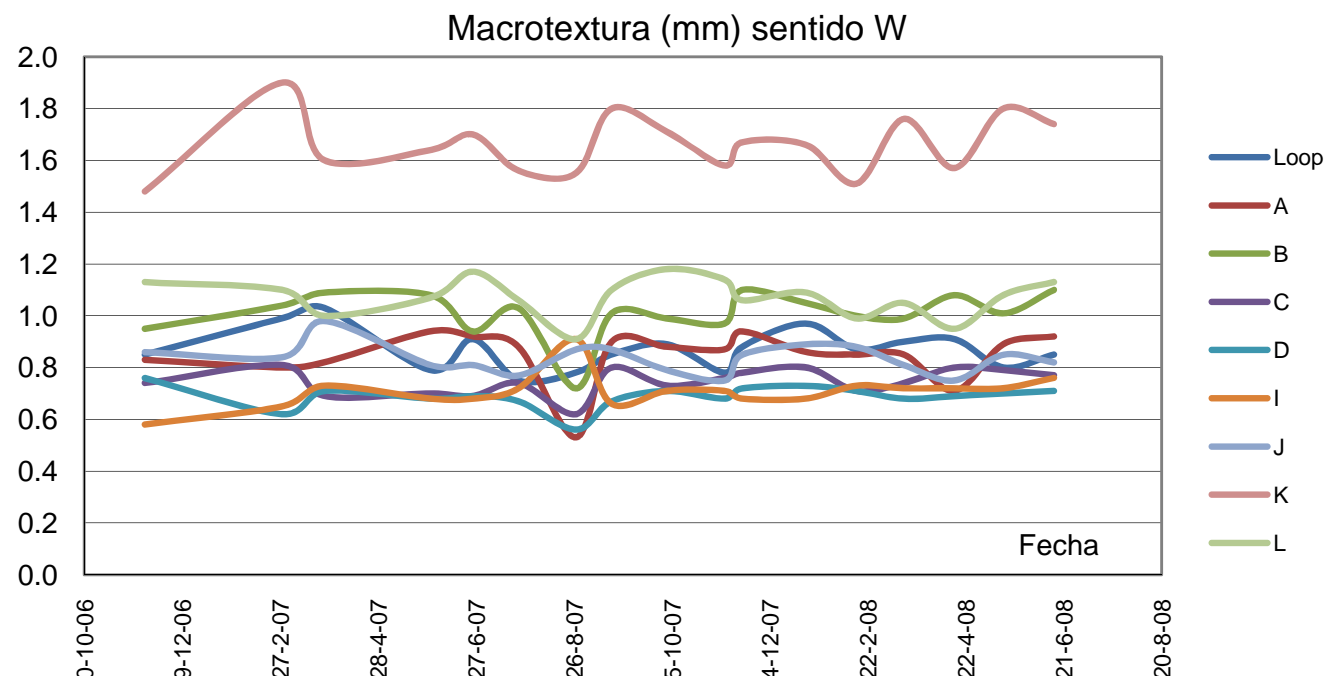


Textura promedio obtenida con CTMeter - Sentido E (mm)																	
Sección	Dic-06	Feb-07	Mar-07	May-07	Jun-07	Jul-07	Ago-07	Sep-07	Oct-07	Nov-07	Dic-07	Ene-08	Feb-08	Mar-08	Abr-08	May-08	Jun-08
Loop	0.97	1.05	1.01	1.03	1.16	1.05	1.01	1.04	1.04	1.03	1.10	1.13	1.06	1.06	1.04	1.00	1.05
A	0.50	0.49	0.51	0.52	0.49	0.48	0.84	0.52	0.50	0.54	0.55	0.54	0.57	0.50	0.74	0.53	0.53
B	0.66	0.64	0.67	0.65	0.66	0.63	1.03	0.65	0.68	0.76	0.72	0.75	0.70	0.74	0.68	0.68	0.74
C	0.65	0.62	0.66	0.63	0.64	0.65	0.79	0.67	0.64	0.66	0.65	0.70	0.68	0.73	0.68	0.71	0.73
D	0.54	0.61	0.51	0.48	0.52	0.49	0.70	0.52	0.53	0.57	0.51	0.57	0.58	0.57	0.55	0.55	0.57
I	0.79	0.83	0.81	0.83	0.82	0.86	0.67	0.95	0.86	0.94	0.85	0.94	0.87	0.91	0.88	0.92	0.95
J	0.95	1.02	0.94	0.84	0.94	0.83	0.79	0.88	0.82	1.06	0.94	0.88	0.93	1.01	0.97	1.04	0.91
K	1.38	1.64	1.36	1.41	1.34	1.29	1.43	1.33	1.41	1.51	1.67	1.45	1.71	1.90	1.41	1.62	1.48
L	0.86	0.87	0.90	0.87	0.93	1.00	0.99	0.94	0.89	0.97	0.89	0.88	0.86	1.08	0.91	1.00	0.90





Textura promedio obtenida con CTMeter - Sentido W (mm)																	
Sección	Dic-06	Feb-07	Mar-07	May-07	Jun-07	Jul-07	Ago-07	Sep-07	Oct-07	Nov-07	Dic-07	Ene-08	Feb-08	Mar-08	Abr-08	May-08	Jun-08
Loop	0.85	0.99	1.03	0.79	0.91	0.75	0.78	0.85	0.89	0.78	0.88	0.97	0.87	0.90	0.91	0.80	0.85
A	0.83	0.80	0.82	0.94	0.92	0.88	0.53	0.90	0.88	0.87	0.94	0.86	0.85	0.85	0.71	0.89	0.92
B	0.95	1.04	1.09	1.08	0.94	1.03	0.72	1.01	0.99	0.97	1.10	1.05	1.00	0.99	1.08	1.01	1.10
C	0.74	0.81	0.69	0.70	0.69	0.74	0.62	0.80	0.73	0.76	0.78	0.80	0.71	0.74	0.80	0.79	0.77
D	0.76	0.62	0.71	0.68	0.69	0.67	0.56	0.67	0.71	0.68	0.72	0.73	0.71	0.68	0.69	0.70	0.71
I	0.58	0.65	0.73	0.68	0.68	0.72	0.91	0.66	0.71	0.71	0.68	0.68	0.73	0.72	0.72	0.72	0.76
J	0.86	0.84	0.98	0.81	0.81	0.77	0.87	0.87	0.79	0.75	0.85	0.89	0.88	0.81	0.75	0.85	0.82
K	1.48	1.90	1.60	1.64	1.70	1.56	1.55	1.80	1.71	1.58	1.67	1.66	1.51	1.76	1.57	1.80	1.74
L	1.13	1.10	1.00	1.07	1.17	1.06	0.91	1.10	1.18	1.14	1.06	1.09	0.99	1.05	0.95	1.08	1.13



		RESULTADOS IFI						Secciones sentido E										Trailer rueda bloqueada					
Loop	Sp	dic-06	feb-07	mar-07	may-07	jun-07	jul-07	ago-07	sep-07	oct-07	nov-07	dic-07	ene-08	feb-08	mar-08	abr-08	jun-08						
	FR60	101	108	105	107	118	108	105	107	107	107	113	116	109	109	107	108						
	F60	0.61	0.65	0.63	0.58	0.60	0.65	0.55	0.61	0.58	0.59	0.60	0.56	0.59	0.59	0.62	0.57						
		0.44	0.46	0.45	0.43	0.45	0.46	0.42	0.44	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.44	0.45	0.43						
A	Sp	59	58	60	61	58	57	90	61	59	63	64	63	65	59	81	62						
	FR60	0.51	0.49	0.47		0.50	0.53	0.45	0.45	0.52	0.48	0.51	0.52	0.48	0.54	0.47	0.48						
	F60	0.38	0.37	0.37		0.37	0.38	0.38	0.36	0.38	0.37	0.38	0.38	0.37	0.39	0.38	0.37						
B	Sp	73	72	74	73	73	71	107	73	75	82	79	81	77	81	75	81						
	FR60	0.55	0.54	0.54	0.46	0.46	0.52	0.45	0.48	0.53	0.50	0.50	0.48	0.51	0.60	0.53	0.51						
	F60	0.40	0.40	0.40	0.37	0.37	0.39	0.40	0.38	0.40	0.39	0.39	0.38	0.39	0.42	0.39	0.39						
C	Sp	73	70	73	71	72	73	85	74	72	73	73	77	75	80	75	80						
	FR60	0.51	0.54	0.54		0.51	0.55	0.47	0.54	0.43	0.53	0.55	0.52	0.54	0.51	0.56	0.48						
	F60	0.39	0.39	0.39		0.39	0.40	0.39	0.40	0.36	0.39	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.38						
D	Sp	63	69	60	57	61	58	77	61	62	65	60	65	66	65	64	65						
	FR60	0.44	0.41	0.43	0.54	0.40	0.40	0.33	0.38	0.36	0.41	0.42	0.41	0.43	0.44	0.47	0.39						
	F60	0.36	0.35	0.35	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.35	0.35	0.35	0.36	0.36	0.37	0.35						
I	Sp	99	106	99	90	99	89	85	93	88	109	99	93	98	105	101	96						
	FR60	0.59	0.64	0.56		0.55	0.59	0.53	0.53		0.56	0.57	0.58	0.57	0.60	0.63	0.53						
	F60	0.42	0.44	0.41		0.41	0.42	0.39	0.41		0.42	0.42	0.43	0.42	0.43	0.44	0.41						
J	Sp	99	106	99	90	99	89	85	93	88	109	99	93	98	105	101	96						
	FR60	0.62	0.63	0.63	0.50	0.60	0.63	0.61	0.62	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.60	0.63	0.55						
	F60	0.44	0.45	0.44	0.40	0.43	0.44	0.42	0.44	0.41	0.44	0.43	0.43	0.43	0.44	0.44	0.42						
K	Sp	138	161	136	141	134	130	142	134	141	150	164	144	168	185	141	147						
	FR60	0.41	0.47	0.48		0.52	0.54	0.56	0.53	0.51	0.53	0.51	0.53	0.52	0.49	0.54	0.50						
	F60	0.41	0.45	0.43		0.44	0.44	0.46	0.44	0.44	0.45	0.46	0.45	0.46	0.47	0.45	0.44						
L	Sp	91	92	95	92	98	104	103	99	94	101	94	93	91	111	96	95						
	FR60	0.55	0.56	0.54	0.53	0.53	0.53	0.51	0.53	0.49	0.53	0.53	0.51	0.52	0.51	0.55	0.48						
	F60	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41	0.42	0.41	0.41	0.40	0.42	0.41	0.40	0.40	0.42	0.42	0.40						

### RESULTADOS IFI Secciones sentido W Trailer rueda bloqueada

		dic-06	feb-07	mar-07	may-07	jun-07	jul-07	ago-07	sep-07	oct-07	nov-07	dic-07	ene-08	feb-08	mar-08	abr-08	jun-08
L	Sp	116	113	104	110	119	109	96	113	120	116	109	112	103	108	99	116
	FR60	0.55	0.56	0.51	0.55	0.52	0.54	0.52	0.53	0.47	0.52	0.55	0.52	0.52	0.52	0.55	0.51
	F60	0.43	0.43	0.41	0.43	0.43	0.43	0.41	0.42	0.41	0.43	0.43	0.42	0.41	0.42	0.42	0.42
K	Sp	147	185	158		167	154	153	176	168	156	164	163	150	172	155	170
	FR60	0.43	0.47	0.44		0.50	0.55	0.56	0.54	0.52	0.53	0.51	0.53	0.51	0.47	0.54	0.51
	F60	0.42	0.47	0.44		0.46	0.46	0.47	0.48	0.47	0.46	0.46	0.46	0.45	0.46	0.46	0.46
J	Sp	91	90	102	87	87	83	92	92	85	81	90	94	93	87	81	88
	FR60	0.56	0.51	0.49	0.51	0.53	0.57	0.52	0.49	0.47	0.56	0.58	0.54	0.53	0.57	0.56	0.53
	F60	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40	0.38	0.41	0.42	0.41	0.41	0.42	0.41	0.40
I	Sp	66	73	80		75	79	96	73		78	75	75	80	79	79	82
	FR60	0.61	0.59	0.56		0.56	0.57	0.57	0.56		0.57	0.60	0.61	0.57	0.56	0.59	0.57
	F60	0.41	0.41	0.41		0.40	0.41	0.42	0.40		0.41	0.41	0.42	0.41	0.41	0.42	0.41
D	Sp	82	70	78	75	76	74	64	74	78	75	79	80	78	75	76	78
	FR60	0.52	0.56	0.50	0.53	0.49	0.53	0.51	0.48	0.49	0.50	0.53	0.51	0.50	0.51	0.56	0.43
	F60	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.39	0.38	0.38	0.39	0.38	0.40	0.39	0.39	0.39	0.40	0.37
C	Sp	81	87	76		76	81	70	86	80	82	84	86	78	81	86	83
	FR60	0.57	0.58	0.52		0.52	0.61	0.55	0.53	0.51	0.56	0.60	0.52	0.56	0.56	0.56	0.52
	F60	0.41	0.42	0.39		0.39	0.42	0.40	0.40	0.39	0.41	0.42	0.40	0.41	0.41	0.41	0.40
B	Sp	99	107	112	111	99	107	79	105	103	101	113	108	104	103	111	113
	FR60	0.64	0.65	0.62	0.61	0.61	0.64	0.60	0.57	0.60	0.64	0.63	0.59	0.61	0.61	0.54	0.59
	F60	0.45	0.46	0.45	0.45	0.44	0.45	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.43	0.44
A	Sp	89	86	88		97	93	62	95	93	92	99	91	90	90	78	97
	FR60	0.60	0.64	0.59		0.53	0.60	0.57	0.56	0.58	0.58	0.59	0.56	0.58	0.62	0.64	0.53
	F60	0.43	0.43	0.42		0.41	0.43	0.40	0.42	0.42	0.42	0.43	0.42	0.42	0.43	0.43	0.41
Loop	Sp	90	103	107	85		81	84	90	94	84	93	101	92	95	96	90
	FR60	0.49	0.56	0.48	0.46		0.48	0.45	0.46	0.40	0.44	0.47	0.46	0.49	0.49	0.47	0.38
	F60	0.39	0.42	0.40	0.38		0.39	0.38	0.39	0.37	0.37	0.39	0.39	0.40	0.40	0.39	0.36

# RESULTADOS IFI Secciones sentido E

# DFTester

		30-5-07	25-6-07	23-7-07	27-8-07	18-9-07	22-10-07	26-11-07	7-12-07	15-1-08	15-4-08	15-5-08	15-6-08
Loop	Sp	107	118	108	105	107	107	107	113	116	107	104	108
	FR60	0.54	0.56	0.55	0.53	0.54	0.56	0.58	0.58	0.60	0.58	0.55	0.56
	F60	0.48	0.49	0.48	0.47	0.48	0.49	0.51	0.51	0.52	0.50	0.48	0.49
A	Sp	61	58	57	90	61	59	63	64	63	81	62	62
	FR60	0.43	0.41	0.41	0.51	0.43	0.45	0.49	0.49	0.49	0.54	0.46	0.46
	F60	0.40	0.38	0.38	0.46	0.39	0.41	0.44	0.44	0.44	0.48	0.41	0.41
B	Sp	73	73	71	107	73	75	82	79	81	75	75	81
	FR60	0.49	0.48	0.48	0.57	0.48	0.52	0.56	0.54	0.58	0.53	0.52	0.54
	F60	0.44	0.43	0.43	0.50	0.44	0.46	0.49	0.48	0.50	0.47	0.46	0.48
C	Sp	71	72	73	85	74	72	73	73	77	75	78	80
	FR60	0.47	0.45	0.47	0.49	0.47	0.48	0.51	0.50	0.53	0.49	0.50	0.50
	F60	0.42	0.41	0.42	0.44	0.42	0.43	0.45	0.44	0.47	0.44	0.44	0.45
D	Sp	57	61	58	77	61	62	65	60	65	64	64	65
	FR60	0.40	0.41	0.40	0.47	0.41	0.44	0.47	0.44	0.48	0.45	0.43	0.46
	F60	0.38	0.38	0.38	0.42	0.38	0.40	0.43	0.40	0.43	0.41	0.39	0.42
I	Sp	90	99	89	85	93	88	109	99	93	101	107	96
	FR60	0.54	0.55	0.51	0.50	0.52	0.55	0.61	0.57	0.58	0.57	0.57	0.56
	F60	0.48	0.48	0.46	0.45	0.46	0.48	0.52	0.50	0.51	0.50	0.50	0.49
J	Sp	90	99	89	85	93	88	109	99	93	101	107	96
	FR60	0.53	0.53	0.52	0.46	0.48	0.51	0.57	0.55	0.53	0.57	0.52	0.55
	F60	0.47	0.47	0.46	0.42	0.44	0.46	0.50	0.48	0.47	0.50	0.46	0.48
K	Sp	141	134	130	142	134	141	150	164	144	141	160	147
	FR60	0.48	0.48	0.49	0.50	0.51	0.50	0.54	0.55	0.55	0.51	0.51	0.50
	F60	0.43	0.43	0.44	0.44	0.45	0.45	0.48	0.49	0.49	0.46	0.45	0.44
L	Sp	92	98	104	103	99	94	101	94	93	96	104	95
	FR60	0.47	0.47	0.50	0.50	0.51	0.48	0.52	0.51	0.51	0.49	0.50	0.49
	F60	0.43	0.43	0.45	0.45	0.46	0.43	0.46	0.46	0.46	0.44	0.45	0.44

# RESULTADOS IFI Secciones sentido W

# DFTester

		30-5-07	25-6-07	23-7-07	27-8-07	18-9-07	22-10-07	26-11-07	7-12-07	15-1-08	15-4-08	15-5-08	15-6-08
L	Sp	110	119	109	96	113	120	116	109	112	99	111	116
	FR60	0.53	0.52	0.51	0.47	0.50	0.53	0.55	0.55	0.57	0.51	0.50	0.52
	F60	0.47	0.46	0.45	0.43	0.45	0.47	0.49	0.48	0.50	0.45	0.45	0.46
K	Sp	161	167	154	153	176	168	156	164	163	155	176	170
	FR60	0.50	0.50	0.51	0.51	0.52	0.53	0.52	0.55	0.56	0.52	0.51	0.54
	F60	0.45	0.45	0.45	0.45	0.46	0.47	0.46	0.49	0.49	0.46	0.45	0.47
J	Sp	87	87	83	92	92	85	81	90	94	81	90	88
	FR60	0.51	0.50	0.47	0.49	0.51	0.51	0.52	0.54	0.56	0.50	0.49	0.51
	F60	0.45	0.44	0.42	0.44	0.45	0.46	0.46	0.48	0.49	0.45	0.44	0.45
I	Sp	75	75	79	96	73	78	78	75	75	79	79	82
	FR60	0.50	0.48	0.48	0.52	0.47	0.51	0.52	0.50	0.52	0.52	0.48	0.46
	F60	0.45	0.43	0.43	0.46	0.43	0.45	0.46	0.45	0.46	0.46	0.43	0.42
D	Sp	75	76	74	64	74	78	75	79	80	76	77	78
	FR60	0.46	0.46	0.45	0.41	0.46	0.50	0.51	0.51	0.54	0.50	0.49	0.48
	F60	0.42	0.42	0.41	0.38	0.42	0.44	0.45	0.45	0.48	0.45	0.44	0.44
C	Sp	111	99	107	79	105	103	101	113	108	111	105	113
	FR60	0.56	0.52	0.54	0.46	0.54	0.56	0.57	0.59	0.60	0.58	0.54	0.58
	F60	0.49	0.46	0.48	0.42	0.48	0.49	0.50	0.52	0.52	0.50	0.48	0.50
B	Sp	111	99	107	79	105	103	101	113	108	111	105	113
	FR60	0.57	0.53	0.54	0.48	0.56	0.56	0.57	0.59	0.59	0.59	0.54	0.59
	F60	0.50	0.47	0.48	0.43	0.49	0.49	0.50	0.51	0.52	0.52	0.48	0.51
A	Sp	99	97	93	62	95	93	92	99	91	78	94	97
	FR60	0.57	0.53	0.52	0.43	0.54	0.56	0.56	0.58	0.57	0.53	0.53	0.56
	F60	0.50	0.47	0.46	0.40	0.48	0.49	0.49	0.51	0.50	0.47	0.47	0.49
LOOP	Sp	85	96	81	84	90	94	84	93	101	96	86	90
	FR60	0.49	0.50	0.48	0.47	0.52	0.55	0.52	0.55	0.57	0.51	0.50	0.49
	F60	0.44	0.45	0.43	0.43	0.46	0.48	0.46	0.48	0.50	0.46	0.45	0.44

# MEDICIONES EN AEROPUERTO



	valores sin corregir						
	FECHA	HS [mm]	BPN medido	Temp agua	BPN correg	F60 medido	F60 corregido
PISTA VIEJA	2-9-04	0.32	71	20	71	0.15	0.15
	7-12-04	0.27	66	30	69	0.11	0.12
	27-5-05	0.32	72	18	72	0.15	0.15
	20-12-05	0.32	69	40	76	0.14	0.15
	18-4-06	0.40	77	20	77	0.20	0.20
PISTA NUEVA	2-9-04	0.57	68	20	68	0.26	0.26
	7-12-04	0.56	60	30	63	0.24	0.25
	27-5-05	0.42	71	19	71	0.21	0.21
	20-12-05	0.37	60	40	67	0.16	0.17
	18-4-06	0.48	69	20	69	0.23	0.23
CARRETEO	2-9-04	1.23	83	20	83	0.48	0.48
	7-12-04	1.15	80	30	83	0.45	0.47
	27-5-05	1.31	85	23	86	0.49	0.50
	20-12-05	1.37	79	40	86	0.47	0.51
	18-4-06	1.23	81	20	81	0.47	0.47

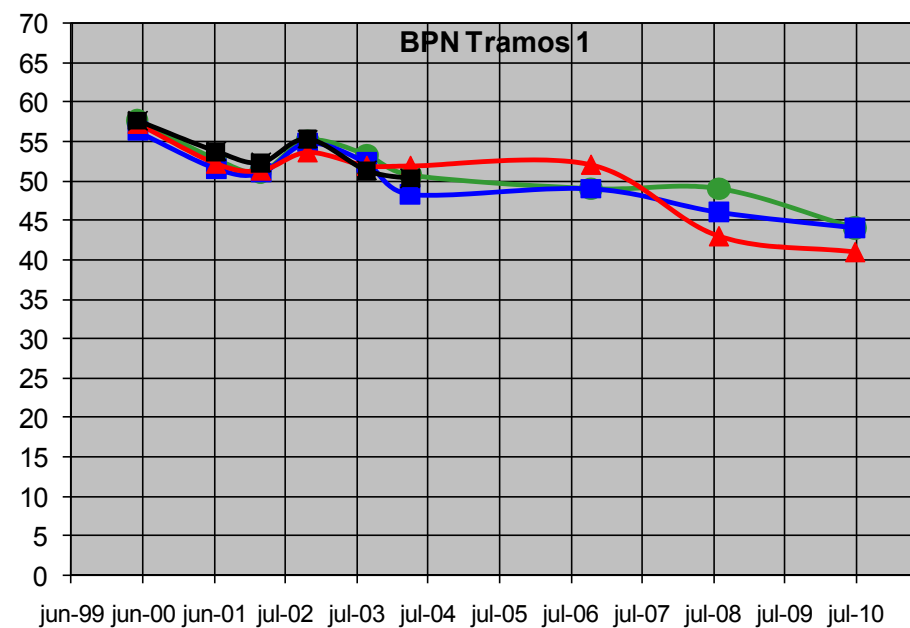
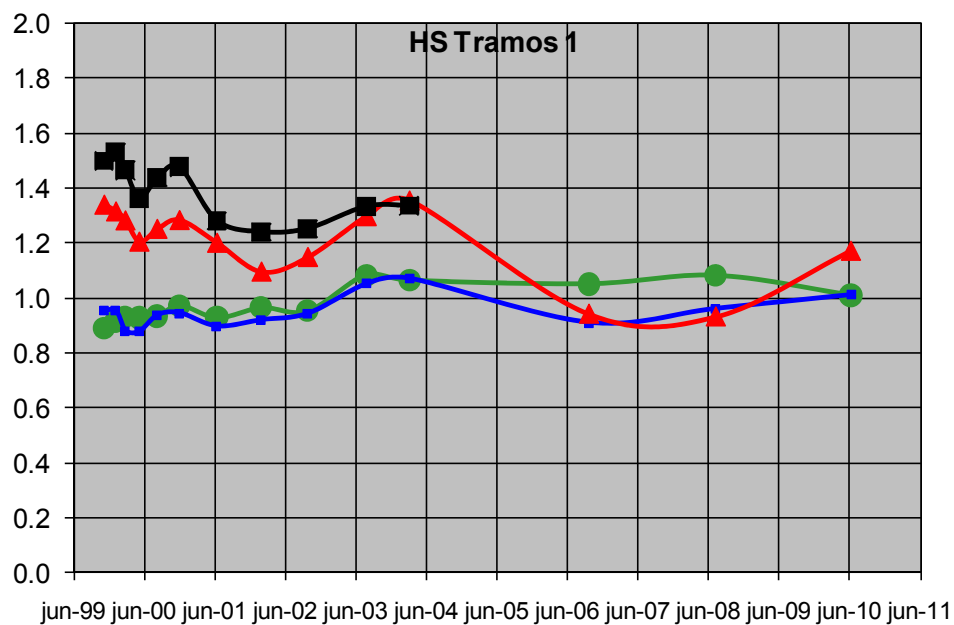
# MEDICIONES EN AUTOPISTA CON TRÁNSITO ELEVADO

## RESULTADOS TRAMOS 1 (carril tránsito rápido)

Macrotextura    Círculo de Arena    HS (mm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO	4-12-99	2-2-00	22-3-00	2-6-00	3-9-00	27-12-00	9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	31-3-04	15-10-06	1-8-08	1-7-10
1A	0.89	0.91	0.93	0.93	0.93	0.97	0.93	0.96	0.95	1.08	1.06	1.05	1.08	1.01
1B	0.95	0.95	0.88	0.88	0.94	0.94	0.90	0.92	0.94	1.05	1.07	0.91	0.96	1.01
1C	1.34	1.31	1.28	1.20	1.25	1.28	1.20	1.09	1.15	1.30	1.35	0.94	0.93	1.17
1D	1.50	1.53	1.46	1.36	1.44	1.48	1.28	1.24	1.25	1.33	1.33			

Coeficiente de Fricción    BPN (corregidos a 20 °C)														
				4			7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO				2-6-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	1-7-10
1A				57.6			53	51	55	53	51	49	49	44
1B				56.3			52	51	55	52	48	49	46	44
1C				57.2			52	51	54	52	52	52	43	41
1D				57.6			54	52	55	51	50			

## RESULTADOS TRAMOS 1 (carril tránsito rápido)



## RESULTADOS TRAMOS 1 (carril tránsito rápido)

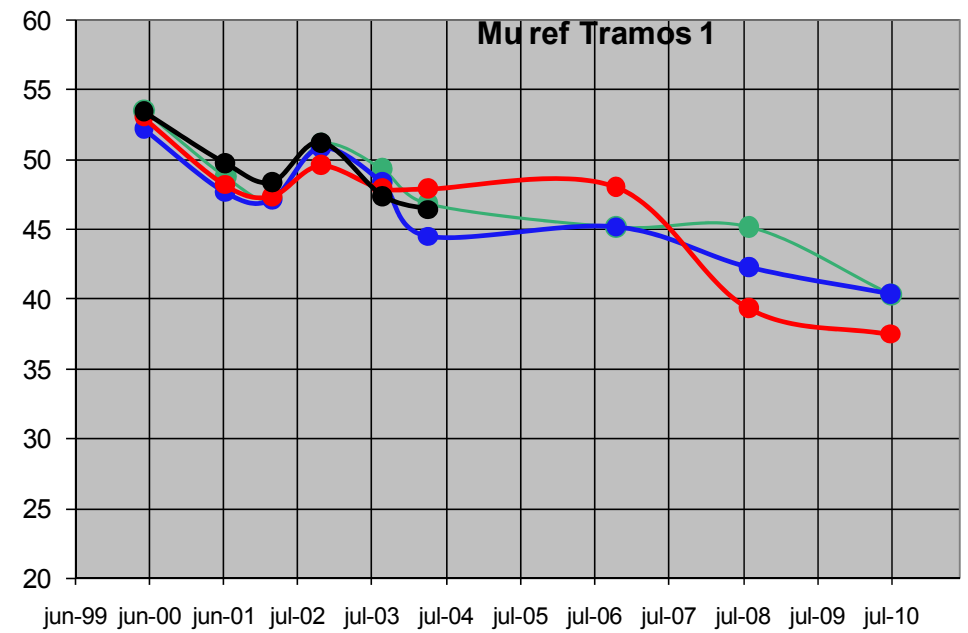
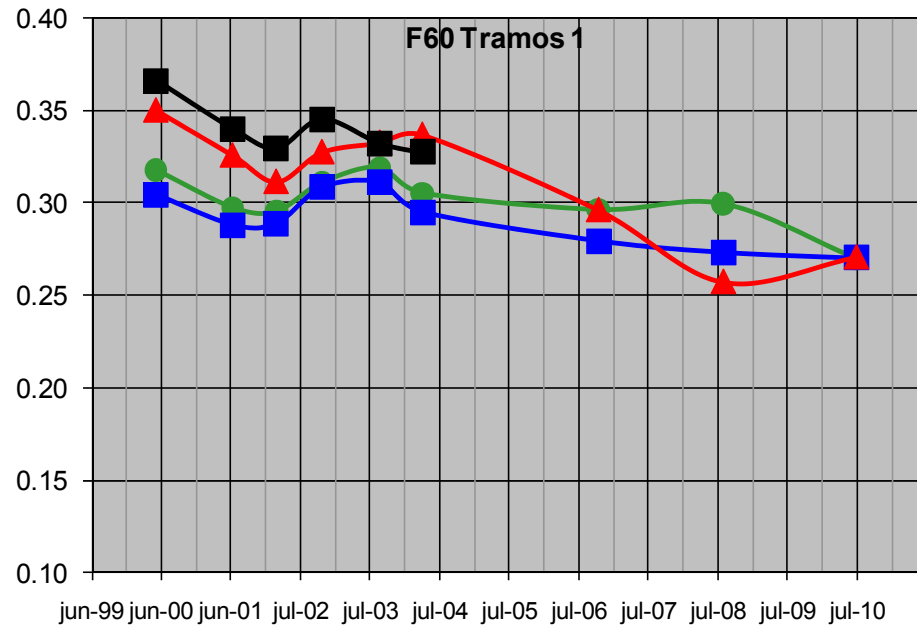
### IFI (Sp, F60)

TRAMO				2-6-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	1-7-10
1A	Sp			94			94	98	97	112	109	108	111	103
	FR60			33.80			30.96	30.70	32.88	34.03	32.08	30.80	31.25	27.10
	F60			0.32			0.30	0.30	0.31	0.32	0.31	0.30	0.30	0.27
1B	Sp			88			90	93	96	108	110	92	97	103
	FR60			31.93			29.64	29.77	32.50	32.88	30.64	28.42	27.54	27.10
	F60			0.30			0.29	0.29	0.31	0.31	0.30	0.28	0.27	0.27
1C	Sp			125			125	113	119	136	142	95	94	121
	FR60			38.35			34.92	32.91	35.17	35.88	36.49	30.76	25.27	27.15
	F60			0.35			0.33	0.31	0.33	0.33	0.34	0.30	0.26	0.27
1D	Sp			143			134	129	131	140	140			
	FR60			40.63			36.98	35.51	37.70	35.87	35.19			
	F60			0.37			0.34	0.33	0.35	0.33	0.33			

### Mu Referencia

TRAMO				2-6-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	1-7-10
1A				54			49	47	51	49	47	45	45	40
1B				52			48	47	51	48	45	45	42	40
1C				53			48	47	50	48	48	48	39	37
1D				53			50	48	51	47	46			

## RESULTADOS TRAMOS 1 (carril tránsito rápido)



## RESULTADOS TRAMOS 2 (carril tránsito intermedio rápido)

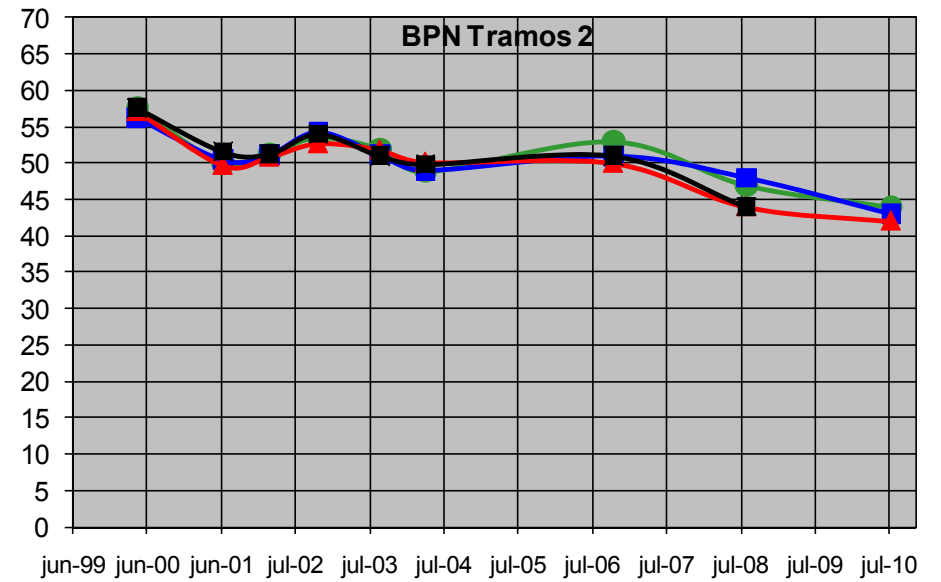
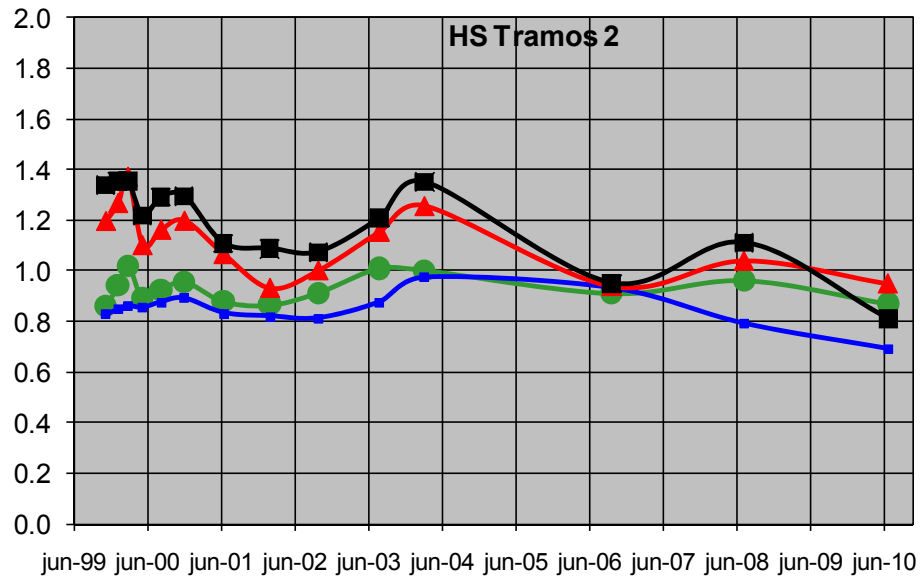
**Macrotextura    Círculo de Arena    HS (mm)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO	4-12-99	2-2-00	22-3-00	2-6-00	3-9-00	27-12-00	9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	31-3-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
2A	0.9	0.94	1.02	0.89	0.92	0.96	0.88	0.87	0.91	1.01	1.00	0.97	0.96	0.87
2B	0.83	0.84	0.86	0.85	0.88	0.89	0.83	0.82	0.81	0.88	0.97	0.82	0.79	0.69
2C	1.20	1.27	1.37	1.10	1.16	1.20	1.07	0.93	1.00	1.16	1.26	1.05	1.04	0.95
2D	1.34	1.35	1.35	1.22	1.29	1.29	1.11	1.09	1.07	1.21	1.35	1.23	1.11	0.81

**Coeficiente de Fricción    BPN (corregidos a 20 °C)**

				4			7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
2A				58			50	51	54	52	49	53	47	44
2B				56			50	51	54	51	49	51	48	43
2C				57			50	51	53	52	50	50	44	42
2D				58			52	51	54	51	50	51	44	43

## RESULTADOS TRAMOS 2 (carril tránsito intermedio rápido)





## RESULTADOS TRAMOS 2 (carril tránsito intermedio rápido)

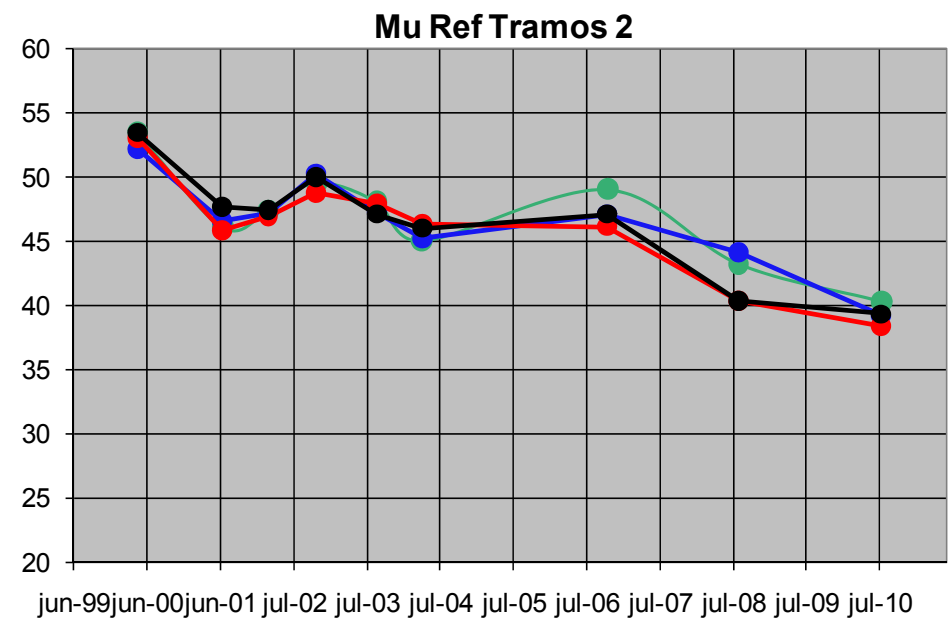
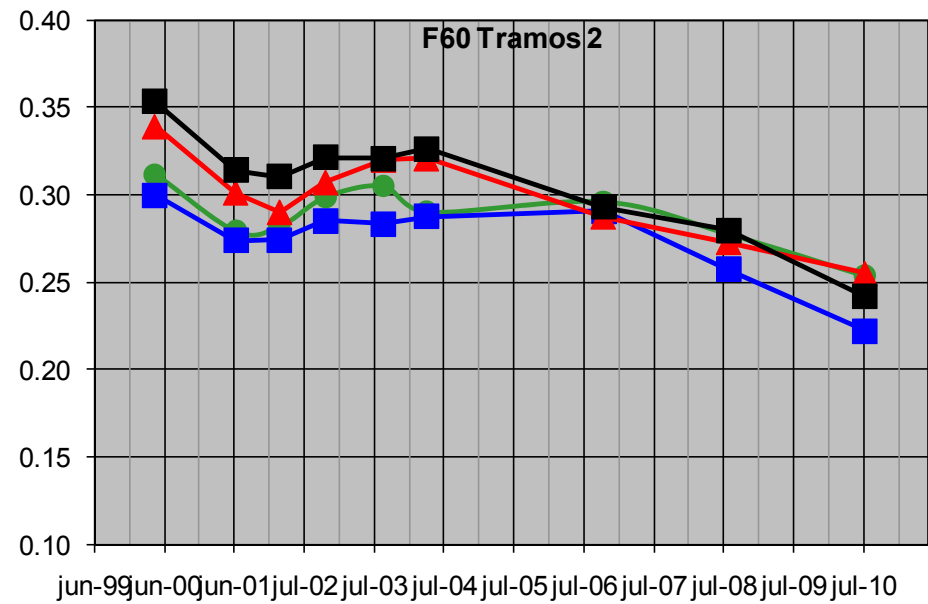
### IFI (Sp, F60)

TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
2A	Sp			90			88	87	92	103	102	99	97	87
	FR60			32.97			28.37	28.81	31.14	32.00	29.92	31.92	28.14	24.81
	F60			0.31			0.28	0.28	0.30	0.30	0.29	0.30	0.28	0.25
2B	Sp			85			83	81	81	88	99	82	78	67
	FR60			31.32			27.60	27.69	29.20	28.95	29.54	27.63	25.32	20.34
	F60			0.30			0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	0.27	0.26	0.22
2C	Sp			114			110	94	102	120	131	108	107	96
	FR60			36.82			31.51	29.94	32.33	34.14	34.26	31.43	27.52	25.00
	F60			0.34			0.30	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.27	0.26
2D	Sp			127			114	112	110	126	142	128	115	80
	FR60			38.83			33.29	32.81	34.33	34.26	35.04	34.53	28.44	23.10
	F60			0.35			0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.32	0.28	0.24

### Mu Referencia

TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
2A				54			46	47	50	48	45	49	43	40
2B				52			47	47	50	47	45	47	44	39
2C				53			46	47	49	48	46	46	40	38
2D				53			48	47	50	47	46	47	40	39

RESULTADOS TRAMOS 2 (carril tránsito intermedio rápido)



## RESULTADOS TRAMOS 4 (carril tránsito intermedio lento)

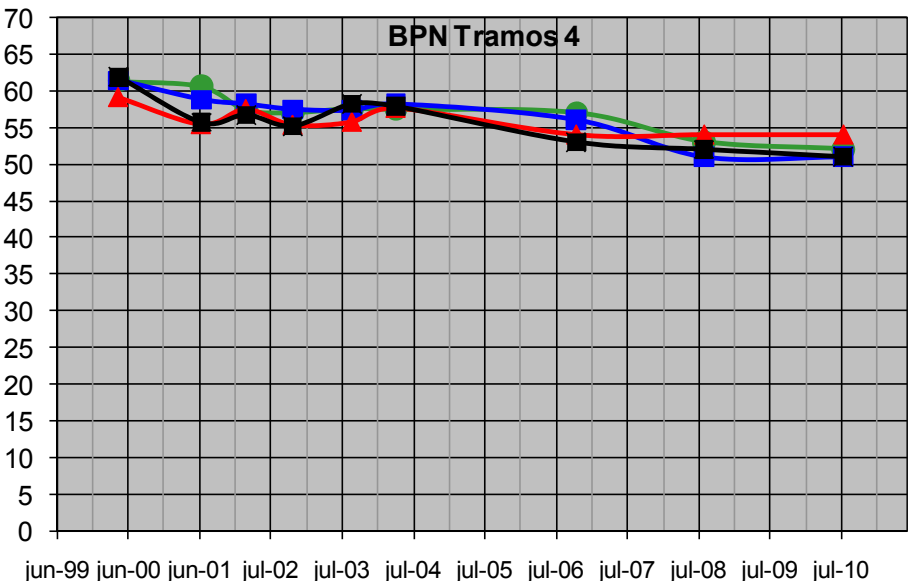
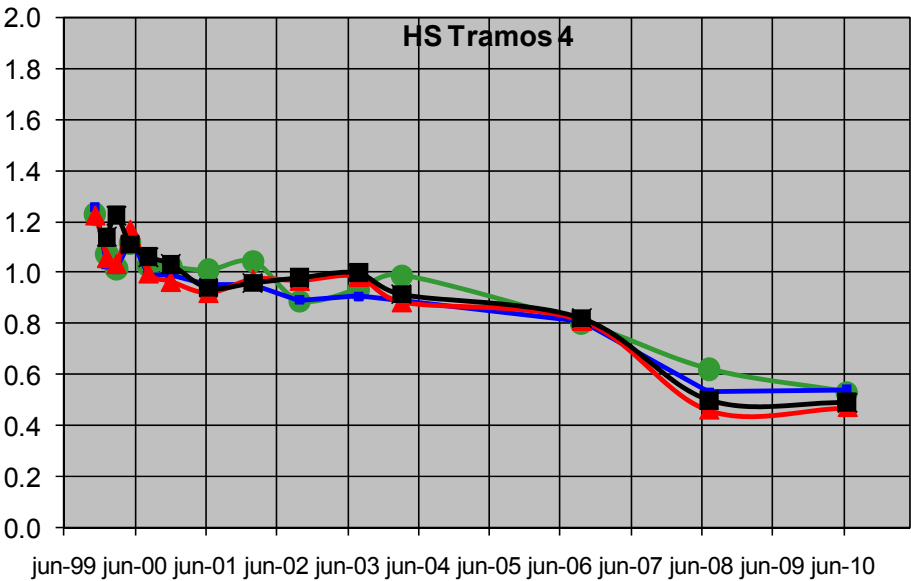
**Macrotextura    Círculo de Arena    HS (mm)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO	4-12-99	2-2-00	22-3-00	2-6-00	3-9-00	27-12-00	9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	31-3-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
4A	1.23	1.07	1.02	1.12	1.03	1.02	1.01	1.04	0.89	0.93	0.99	0.91	0.62	0.53
4B	1.26	1.03	1.02	1.13	0.99	0.99	0.95	0.95	0.89	0.91	0.89	0.8	0.53	0.54
4C	1.23	1.06	1.03	1.17	1.00	0.96	0.92	0.97	0.97	0.98	0.88	0.82	0.46	0.47
4D		1.14	1.22	1.11	1.06	1.03	0.94	0.96	0.98	1.00	0.91	0.83	0.5	0.49

**Coeficiente de Fricción    BPN (corregidos a 20 °C)**

				4			7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
4A				61.3			60.6	57.4	57.0	57.6	57.4	55	53	52
4B				61.4			58.8	58.1	57.4	57.3	58.1	54	51	51
4C				59.1			55.4	57.5	55.3	55.8	57.7	56	53	54
4D				61.8			55.7	56.7	55.2	58.2	57.8	56	52	51

RESULTADOS TRAMOS 4 (carril tránsito intermedio lento)



## RESULTADOS TRAMOS 4 (carril tránsito intermedio lento)

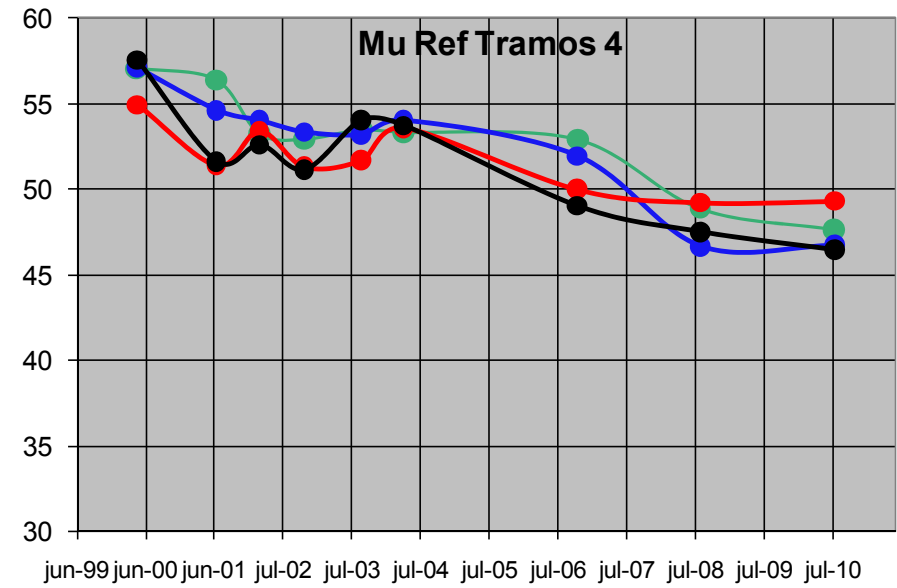
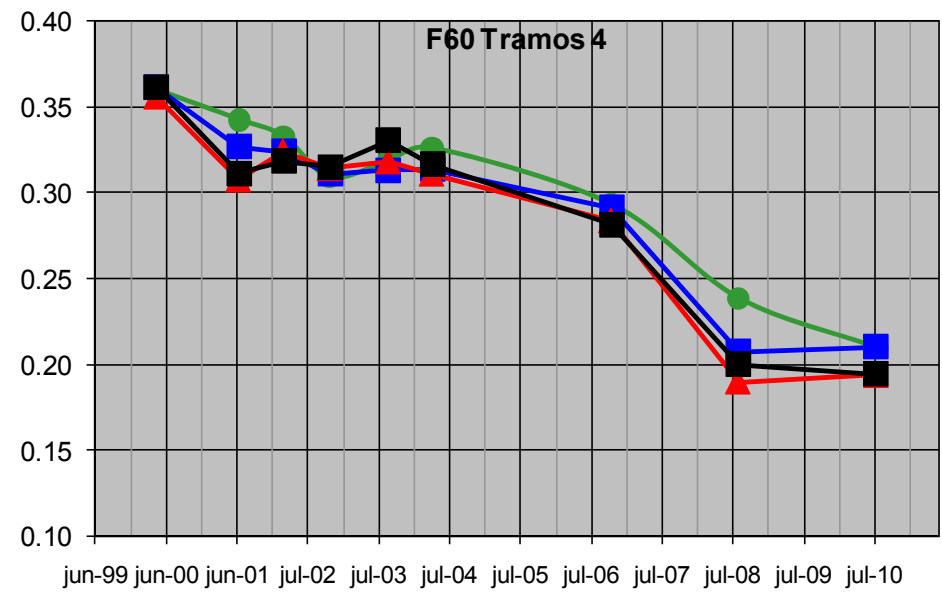
### IFI (Sp, F60)

TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
4A	Sp			115			103	107	89	95	101	92	59	49
	FR60			39.73			37.29	35.91	32.57	33.93	34.96	31.90	22.66	18.60
	F60			0.36			0.34	0.33	0.31	0.32	0.33	0.30	0.24	0.21
4B	Sp			117			97	97	90	92	90	79	49	50
	FR60			39.96			35.05	34.66	32.87	33.19	33.26	28.75	18.24	18.67
	F60			0.36			0.33	0.32	0.31	0.31	0.31	0.28	0.21	0.21
4C	Sp			121			93	99	98	100	89	82	41	42
	FR60			39.15			32.35	34.69	33.28	33.84	32.83	30.34	15.50	16.33
	F60			0.36			0.31	0.32	0.31	0.32	0.31	0.29	0.19	0.19
4D	Sp			114			95	97	100	102	92	83	45	44
	FR60			39.95			32.90	33.92	33.40	35.61	33.64	30.60	17.21	16.40
	F60			0.36			0.31	0.32	0.31	0.33	0.32	0.29	0.20	0.19

### Mu Referencia

TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
4A				57			56	53	53	53	53	51	49	48
4B				57			55	54	53	53	54	50	47	47
4C				55			51	53	51	52	54	52	48	49
4D				58			52	53	51	54	54	52	48	46

RESULTADOS TRAMOS 4 (carril tránsito intermedio lento)



## RESULTADOS TRAMOS 5 (carril tránsito lento)

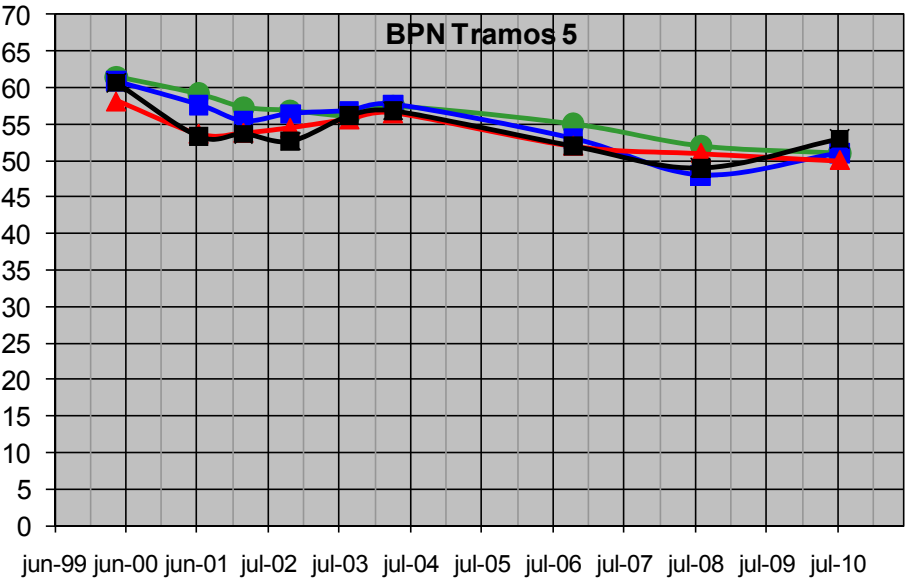
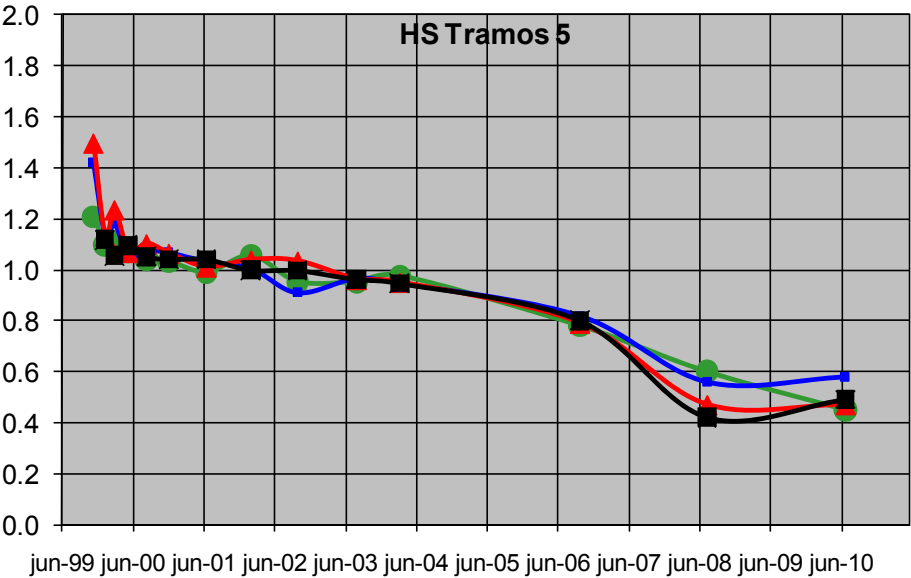
**Macrotextura    Círculo de Arena    HS (mm)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TRAMO	4-12-99	2-2-00	22-3-00	2-6-00	3-9-00	27-12-00	9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	31-3-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
5A	1.21	1.10	1.11	1.07	1.04	1.03	0.99	1.06	0.95	0.95	0.98	0.93	0.6	0.45
5B	1.42	1.14	1.18	1.05	1.08	1.07	1.03	1.01	0.91	0.97	0.95	0.89	0.56	0.58
5C	1.50	1.13	1.24	1.07	1.10	1.06	1.01	1.04	1.03	0.96	0.95	0.89	0.47	0.47
5D		1.12	1.05	1.10	1.05	1.04	1.04	1.00	1.00	0.96	0.95	0.91	0.42	0.49

**Coefficiente de Fricción    BPN (corregidos a 20 °C)**

TRAMO				4			7	8	9	10	11	12	13	14
5A				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
5B				61.5			59.1	57.3	56.9	56.1	57.4	55	52	51
5C				60.9			57.7	55.4	56.4	56.9	57.7	52	48	51
5D				58.2			53.7	53.8	54.5	55.7	56.5	54	51	50
				60.7			53.3	53.7	52.7	56.2	56.8	53	47	53

RESULTADOS TRAMOS 5 (carril tránsito lento)





## RESULTADOS TRAMOS 5 (carril tránsito lento)

### IFI (Sp, F60)

				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
				110			101	108	97	97	99	94	57	40
				39.06			36.03	36.12	33.90	33.49	34.72	32.33	21.49	14.40
				0.35			0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.31	0.23	0.18
				108			106	103	92	98	96	90	52	54
				38.30			35.95	34.07	32.75	34.22	34.33	29.75	18.36	20.31
				0.35			0.33	0.32	0.31	0.32	0.32	0.29	0.21	0.22
				110			103	106	106	98	96	90	42	42
				36.88			33.06	33.62	33.98	33.36	33.63	30.89	15.42	15.12
				0.34			0.31	0.32	0.32	0.31	0.32	0.30	0.19	0.19
				113			107	102	102	98	96	92	36	44
				38.97			33.37	32.85	32.21	33.66	33.76	30.74	11.78	17.05
				0.35			0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.30	0.16	0.20

### Mu Referencia

TRAMO				11-5-00			9-7-01	24-2-02	22-10-02	22-8-03	2-4-04	15-10-06	1-8-08	15-7-10
5A				57			55	53	53	52	53	51	48	46
5B				57			54	51	52	53	54	48	44	47
5C				54			50	50	51	52	52	50	46	45
5D				56			49	50	49	52	53	49	42	48

RESULTADOS TRAMOS 5 (carril tránsito lento)

